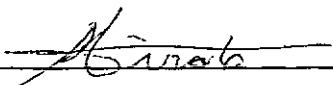


ANÁLISE DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM
OLEODUTOS

Marcelo Rosa Rennó Gomes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

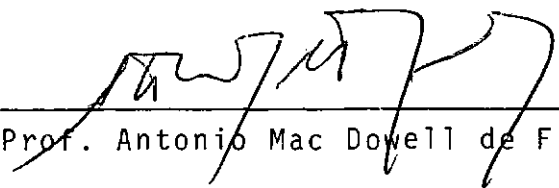
Aprovada por:



Prof. Miguel Hiroo Hirata
(Presidente)



Prof. Edmundo Koelle



Prof. Antonio Mac Dowell de Figueiredo

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JANEIRO DE 1984

RENNÓ, MARCELO ROSA GOMES

Análise de Transientes Hidráulicos em
Oleodutos (Rio de Janeiro) 1984.

VIII, 91p. 29,7cm (COPPE-UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Mecânica, 1984)

Tese - Univ.Fed. Rio de Janeiro, Fac. de
Engenharia.

1.Hidráulica I.COPPE/UFRJ II.Título(Série)

Dedico este trabalho à Maria Teresa, à minha mãe e ao meu pai (o melhor engenheiro que conheço).

AGRADECIMENTOS

Quero externar meus agradecimentos, aos colegas e amigos que me apoiaram e auxiliaram na elaboração desse trabalho:

- Às minhas chefias da PETROBRÁS pela oportunidade e incentivo.

- Ao Prof. Miguel Hirata pela orientação e acompanhamento.

- Ao Prof. Edmundo Koelle pelas sugestões.

- Aos colegas Glauco Colepicollo e Paulo Scorza pelo auxílio na validação do programa desenvolvido, via análise comparativa com outros programas, e eventuais, testes experimentais.

Resumo da tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciência (M.Sc).

ANÁLISE DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM OLEODUTOS

Marcelo Rosa Rennó Gomes

Fevereiro, 1984

Orientador: Miguel Hiroo Hirata

Programa: Engenharia Mecânica

A fim de assegurar que as tubulações e equipamentos dos oleodutos não estejam submetidos a pressões superiores às admissíveis, faz-se necessária a análise dos transientes hidráulicos.

O presente trabalho, apresenta o programa de computador (TRANSH), desenvolvido pelo autor para calcular os transientes hidráulicos determinísticos de oleodutos. As equações diferenciais parciais hiperbólicas que regem o fenômeno foram transformadas em equações diferenciais ordinárias através do método das características. Utilizando-se diferenças finitas, transforma-se, finalmente, as equações diferenciais ordinárias em equações algébricas, apropriadas para a programação de computadores digitais.

O programa desenvolvido modela os equipamentos normalmente utilizados na indústria do petróleo para o transporte de fluidos (bombas, válvulas de bloqueio e retenção, válvulas de alívio, tanques, etc.).

Problemas práticos de engenharia, analisados pelo TRANSH, foram apresentados no trabalho, exemplificando o uso do programa de computador desenvolvido.

Abstract of thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANÁLISE DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM OLEODUTOS

Marcelo Rosa Rennó Gomes

February, 1984

Chairman: Miguel Hiroo Hirata

Department: Mechanical Engineering

In order to ensure that the piping and equipment of oil pipelines are not exposed to inadmissible pressures it is necessary to analyse hydraulic transients.

The present work presents a computer program (TRANSH), developed by the author for calculating the hydraulic transients relevant to oil pipelines. The hyperbolic partial differential equations which govern this phenomenon were transformed into ordinary differential equations via the method of characteristics. Using finite differences these ordinary differential equations are then transformed into algebraic equations which may be solved on a computer.

The program developed here models equipments usually found in the petrol industry for transporting fluids (pumps, block valves, check valves, relief valves, tanks, etc.).

To demonstrate the use of TRANSH program it was presented analysis of 2 (two) practical engineering problems.

ÍNDICE

	Página
I - <u>INTRODUÇÃO</u>	1
II - <u>MODELAÇÃO MATEMÁTICA</u>	4
II.1 - HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS	4
II.2 - EQUAÇÃO DO MOVIMENTO	4
II.3 - CÁLCULO DA CELERIDADE	7
II.4 - EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE	16
III - <u>MÉTODOS NUMÉRICOS</u>	20
III.1- MÉTODOS NUMÉRICOS NORMALMENTE UTILIZADOS	20
III.2- MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS	21
IV - <u>DETERMINAÇÃO DA VAZÃO E PRESSÃO (HEAD) NOS PON-</u> <u>TOS INTERIORES</u>	27
IV.1 - CÁLCULO PELA APROXIMAÇÃO DE 1ª ORDEM	27
IV.2 - CÁLCULO PELA APROXIMAÇÃO DE 2ª ORDEM	29
IV.3 - ANÁLISE COMPARATIVA DAS APROXIMAÇÕES	31
V - <u>DETERMINAÇÃO DA VAZÃO E PRESSÃO (HEAD) NOS CON-</u> <u>TORNOS DO SISTEMA</u>	39
V.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	39
V.2 - RESERVATÓRIO A NÍVEL CONSTANTE	42
V.3 - VÁLVULA DE BLOQUEIO	44
V.4 - INÉRCIA CONCENTRADA	48
V.5 - BOMBAS	50
V.6 - VÁLVULA DE ALÍVIO	54
V.7 - VÁLVULA DE BLOQUEIO INTERMEDIÁRIA	61

VI	- <u>TRANSIENTES HIDRÁULICOS DETERMINÍSTICOS EM</u> <u>OLEODUTOS</u>	63
VI.1	- CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	63
VI.2	- OPERAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS	63
VI.3	- FECHAMENTO DE VÁLVULA DE BLOQUEIO COM OLEODUTO EM OPERAÇÃO	65
VI.4	- ANÁLISE DO TRANSIENTE EM OLEODUTOS OPERANDO EM "CASCATA"	69
VII	- <u>EXEMPLOS DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS ANALISADOS</u> <u>PELO PROGRAMA TRANSH</u>	72
VII.1-	CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	72
VII.2-	OLEODUTO PARA CARREGAMENTO DE NAVIOS	72
VII.3-	SISTEMA DE OLEODUTOS DA BACIA DE CAMPOS	77
VIII	- <u>CONCLUSÕES</u>	83
	SIMBOLOGIA	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

I - INTRODUÇÃO

Todo sistema de transporte de fluidos (tubulação, túnel, canal, etc.), está sujeito ao fenômeno do transiente hidráulico. Esse fenômeno ocorre quando há variação na vazão, a qual provoca perturbações tais como ondas de pressão, que são propagadas através do sistema.

O estudo dessas perturbações e os aspectos associados a ela, constituem o problema básico do Transiente Hidráulico, que também é denominado: transitório de pressão, golpe de ariete, "water-hammer", "surge", etc.

O regime transiente ocorre sempre entre dois regimes permanentes ao se efetuar uma "manobra" no sistema, podendo o regime permanente ser considerado um caso particular do regime transiente.

Entre as manobras mais comuns podemos citar:

- Partida/parada de bombeamento
- Fechamento/abertura de válvulas
- Atuação de válvula de controle

Em vários tipos de instalação, as variações de pressão associadas às variações de vazão não causam danos à instalação. Em outros tipos de instalação deve-se tomar cuidado no projeto e subsequente operação do sistema, a fim de garantir que os tubos, bombas, válvulas e outros componentes estejam protegidos contra eventuais falhas ou danos.

O transiente hidráulico pode ser descrito pela equação do movimento e equação da continuidade. A solução dessas equações permite a interpretação física do fenômeno e a deter-

minação das pressões e vazões nas várias secções da tubulação, durante o transiente.

Os esquemas de cálculo adotados na análise dos transientes hidráulicos utilizados anteriormente ao advento dos computadores, utilizavam métodos aritméticos ou métodos gráficos.

Os métodos aritméticos tiveram sua grande utilização até 1930, época da origem dos métodos gráficos, que foram os mais difundidos entre 1930 e 1960. Esse método basicamente despreza o efeito da perda de carga, podendo no entanto serem introduzidos artifícios para a consideração do efeito dessa.

Atualmente, há a tendência natural da utilização de computadores digitais e o equacionamento baseado no método das características, que possibilita a rápida obtenção de resultados precisos.

Programas de computadores têm sido desenvolvidos no intuito de equacionar e resolver os problemas de transientes comumente encontrados nos sistemas hidráulicos. Estes programas "tentam" abranger o equacionamento e a interpretação da maioria das estruturas de controle de sistemas hidráulicos (bombas, válvulas, tanques e vasos hidro-pneumáticos, chaminés de equilíbrio, etc.).

O trabalho em exposição, apresenta um programa de computador (TRANSH), desenvolvido para solucionar os problemas de transientes hidráulicos normalmente encontrados em oleodutos. Por ser específico, o mesmo possui maior simplicidade, demandando menor tempo de computação que os programas ofertados no mercado. As estruturas de controle (válvulas de alívio) e os aspectos operacionais inerentes aos oleodutos, foram estudados em detalhe.

A análise do transiente hidráulico de oleodutos, via métodos computacionais, possibilita o correto dimensionamento da tubulação, de acordo com as normas de projeto da área (ANSI B 31.4). Segundo esta Norma, a tubulação de oleodutos pode ser submetida a tensões equivalentes a 72% da tensão de escoamento em regime permanente e 79,2% em regime transiente. Caso não se disponha de ferramentas de cálculo que possam calcular com razoável precisão as pressões em regime transiente, as mesmas devem ser super-estimadas segundo critérios conservativos, que levam ao super-dimensionamento.

É importante salientar que o super-dimensionamento citado no parágrafo anterior, possui grande relevância em termos econômicos, no caso de oleodutos. Exemplificando, o super-dimensionamento de $(1/16)$ " na espessura da tubulação, de um oleoduto de 200 Km, acarreta em um acréscimo de 7680 ton de aço, correspondente a aproximadamente $\text{US\$}8.0 \times 10^6$.

II - MODELAÇÃO MATEMÁTICA

II.1 - HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS

Todo modelo matemático está sujeito a hipóteses simplificadoras e/ou restritivas inerentes a adequação do modelo matemático ao sistema real.

As hipóteses restritivas adotadas foram:

- Escoamento interno em tubulações circulares
- Escoamento de líquidos

As hipóteses simplificadoras adotadas foram:

- Escoamento unidimensional
- Utilização da fórmula de **Darcy-Weisbach** para cálculo da perda de carga
- Fator de atrito do regime transiente calculado pela modelação desenvolvida para o regime permanente.

II.2 - EQUAÇÃO DO MOVIMENTO

Seguindo a dedução desenvolvida por **Wylie e Streeter**⁽¹⁶⁾, a equação do movimento obtida, é válida para tubos cilíndricos ou cônicos. Conforme a hipótese simplificadora adotada, o regime sendo unidimensional, a pressão e a velocidade são consideradas constantes ao longo da seção transversal da tubulação. A equação foi desenvolvida em termos das variáveis pressão ($p(x,t)$) e velocidade ($v(x,t)$). Posteriormente, essas foram convertidas para o Head ou Carga ($H(x,t)$) e vazão ($Q(x,t)$). As equações resultantes da resolução aqui proposta, consideram as variáveis dependentes \underline{H} e \underline{Q} e as independentes \underline{x} e \underline{t} .

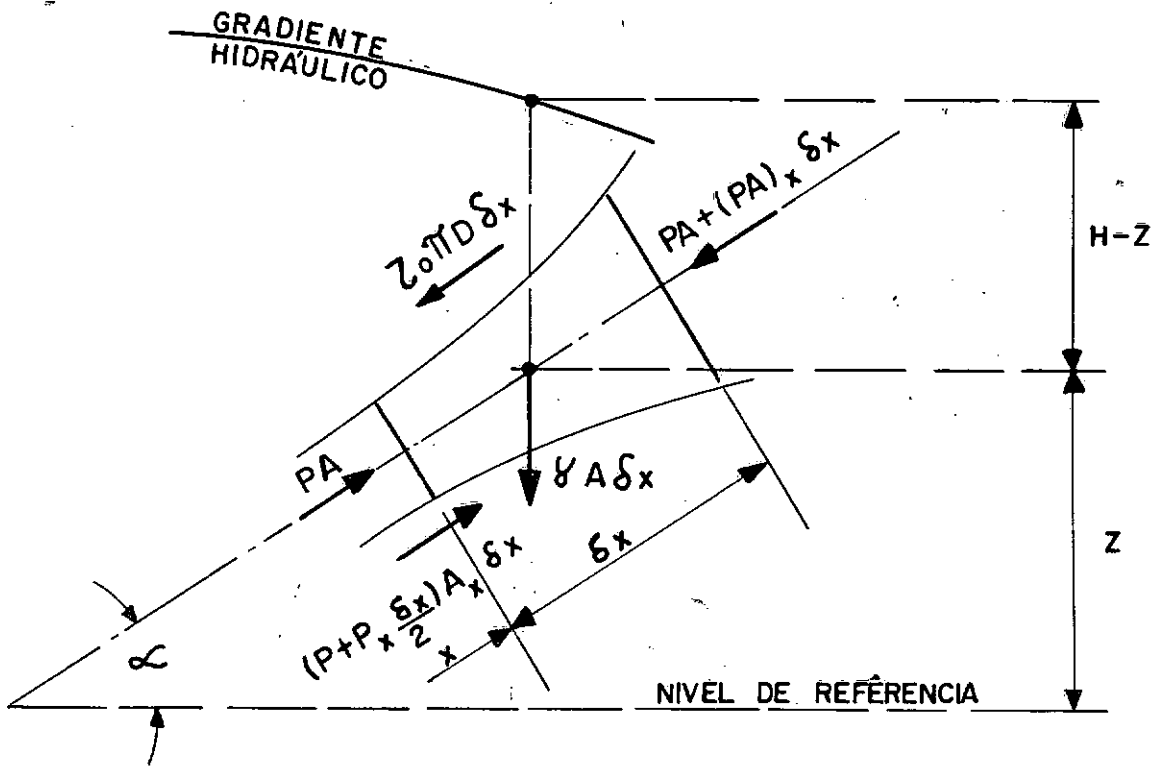


Figura II.1 — Diagrama de Corpo Livre

Aplicando a 2ª Lei de Newton, tem-se:

$$pA - [pA + (pA)_x \delta x] + (p + p_x \frac{\delta x}{2}) A_x \delta x - \tau_0 \pi D \delta x - \gamma A \delta x \text{sen} \alpha = \rho A \delta x \dot{v} \quad (\text{II.1})$$

Simplificando e eliminando termos em δx^2 , tem-se:

$$p_x A + \tau_0 \pi D + \rho g A \text{sen} \alpha + \rho A \dot{v} = 0 \quad (\text{II.2})$$

Para cálculo de τ_0 , considerou-se que a perda de carga ao longo da tubulação possa ser calculada da mesma forma que no regime permanente. Portanto, vale a fórmula de **Darcy-Weisbach**, onde:

$$\Delta p = \frac{\rho f L v^2}{2D}$$

Fazendo um balanço de forças, tem-se:

$$\tau_0 \pi DL = \frac{\rho f L v^2}{2D} \cdot \frac{\pi D^2}{4}$$

$$\text{Logo; } \tau_0 = \frac{\rho f v^2}{8} = \frac{\rho f v |v|}{8} \quad (\text{II.3})$$

O valor absoluto da velocidade, introduzido na equação (II.3), assegura que a tensão de cisalhamento na parede (τ_0) seja sempre oposta a velocidade (direção do escoamento).

O termo \dot{v} , representa a aceleração da partícula de fluido. A velocidade de cada partícula é função das variáveis independentes x e t . Portanto, o termo aceleração \dot{v} , deve levar em conta as variações da velocidade com as variáveis x e t . Essa aceleração é comumente denominada de material ou substantiva, e pode ser deduzida da seguinte forma:

$$\begin{aligned} v &= v(x, t) \\ dv &= v_x dx + v_t dt \\ \frac{dv}{dt} &= \dot{v} = v_x \frac{dx}{dt} + v_t \\ \dot{v} &= v v_x + v_t \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Substituindo as equações (II.3) e (II.4) em (II.2), tem-se:

$$\begin{aligned} p_x A + \frac{\rho f v |v|}{8} \cdot \pi D + \rho g A \sin \alpha + \rho A (v v_x + v_t) &= 0 \\ \text{ou, } \frac{p_x}{\rho} + v v_x + v_t + g \sin \alpha + \frac{f v |v|}{2D} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

Definindo o Head ou Carga (H), como a soma do valor da pressão (em metros de coluna de líquido) + cota ao longo da tubulação em relação a um determinado nível de referência, tem-se:

$$\begin{aligned} H &= \frac{p}{\rho g} + Z \\ p &= \rho g (H - Z) \end{aligned}$$

Considerou-se ρ como constante quando comparado com H e Z . Essa limitação é válida para escoamento de líquidos. Logo:

$$P_x = \rho g (H_x - Z_x)$$

$$Z_x = \text{sen}\alpha$$

$$P_x = \rho g (H_x - \text{sen}\alpha) \quad (\text{II.6})$$

Substituindo (II.6) em (II.5), tem-se:

$$\rho g (H_x - \text{sen}\alpha) \cdot \frac{1}{\rho} + v v_x + v_t + g \text{sen}\alpha + \frac{f v |v|}{2D} = 0$$

$$g H_x + v v_x + v_t + \frac{f v |v|}{2D} = 0 \quad (\text{II.7})$$

A equação (II.7) representa a conservação da quantidade de movimento de escoamentos internos, unidimensionais em tubulações circulares escoando líquidos.

Conforme exposto na introdução, o regime permanente pode ser considerado como um caso particular do regime transiente. De fato, fazendo $v_x = v_t = 0$, tem-se:

$$H_x = - \frac{f v |v|}{2Dg}, \quad \text{ou}$$

$$\Delta H = - \frac{f \cdot \Delta x \cdot v |v|}{D 2g}, \quad \text{que é a equação de Darcy-Weisbach}$$

correspondente ao princípio de conservação da quantidade de movimento para o regime permanente de escoamento no interior de tubulações circulares.

II.3 - CÁLCULO DA CELERIDADE

II.3.1 - Considerações Preliminares

Uma vez provocada uma perturbação no meio fluido do

sistema hidráulico através de execução de "manobras", a mesma é transmitida no meio com a velocidade de propagação a comumente denominada de celeridade.

O valor da celeridade é função das características do fluido transportado (módulo de compressibilidade e densidade) e da tubulação (diâmetro, espessura e fixação no solo). Para a determinação da influência destas variáveis na celeridade, é necessário verificar inicialmente qual função associa o incremento (negativo ou positivo) do Head ou Carga (ΔH) com o incremento da velocidade (ΔV). Para tanto, isolou-se um volume de controle no qual esteja sendo propagada uma onda de pressão:

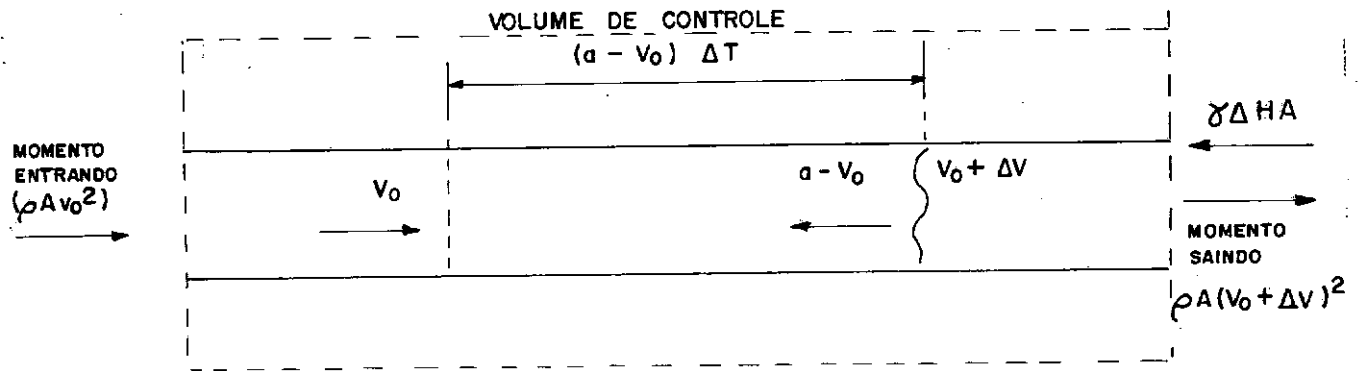


Figura II.2 — Volume de Controle para determinação da função $\Delta H \times v$

Pela conservação da quantidade de movimento, o somatório de forças na superfície de controle é igual a soma da variação interna da quantidade de movimento e da variação da quantidade de movimento na superfície de controle.

Somatório das forças externas = $-\gamma \Delta H A$

Variação interna da quantidade
de movimento

$$= \rho \frac{A(a-v_0)}{\Delta t} \Delta t (v_0 + \Delta v - v_0) =$$

$$= \rho A(a-v_0) \Delta v$$

Variação da quantidade de movii
mento na Superfície de Contro-
le

$$= \rho A(v_0 + \Delta v)^2 - \rho A v_0^2$$

$$-\gamma \Delta H A = \rho A(a-v_0) \Delta v + \rho A(v_0 + \Delta v)^2 - \rho A v_0^2$$

Simplificando e desprezando termos em Δv^2 , tem-se:

$$\Delta H = - \frac{a \Delta v}{g} \left(1 + \frac{v_0}{a} \right)$$

A celeridade a em tubulações de aço possui valores no
entorno de 1000 m/seg. A velocidade v₀ varia em média de 1 a
3 m/seg. Portanto, a parcela v_0/a da fórmula acima é despre-
zível, logo:

$$\Delta H = - \frac{a \Delta v}{g} \quad (\text{II.8})$$

II.3.2 - Módulo de Elasticidade Volumétrica de Fluidos

A compressibilidade do fluido é calculada pelo valor
requerido de acréscimo de pressão (dp) necessário para provo-
car a variação percentual dV/V no volume inicial V . Assim, a
expressão que representa o "módulo de elasticidade volumétrica"
é:

$$K = \frac{dp}{\left(\frac{dV}{V} \right)}$$

Considerando a massa (M) constante, tem-se:

$$\frac{dV}{V} = - \frac{d\rho}{\rho} \quad , \quad \text{logo:}$$

$$K = \frac{dp}{\left(\frac{dp}{\rho}\right)} \quad (\text{II.9})$$

II.3.3 - Coeficientes de Fixação da Tubulação

Durante o transiente, a tubulação é submetida a sobrepressões que provocam variações da área transversal. Este comportamento é determinado pela avaliação do parâmetro (\dot{A}/\dot{A}_p) . Na figura abaixo, foram representadas as forças atuantes num semi-cilindro de um tubo de parede fina ($D/e \geq 100$).

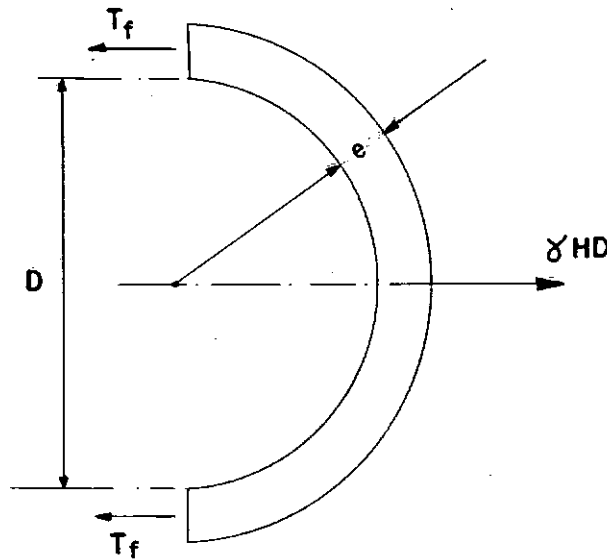


Figura II.3 — Corte axial da tubulação

Definindo σ_1 como sendo a tensão axial e σ_2 a tensão circunferencial e utilizando a lei de Hook, tem-se:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} = \text{Deformação axial}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} = \text{Deformação circunferencial}$$

O Módulo de **Poisson**, relaciona a deformação existente na direção axial e sua decorrente deformação na direção circunferencial, da seguinte forma:

$$\mu = - \frac{\epsilon}{\epsilon_1}$$

A deformação circunferencial total pode ser definida como:

$$\epsilon_T = \epsilon_2 - \mu \epsilon_1$$

Calcula-se o parâmetro \dot{A}/A da seguinte forma:

$$\dot{A} = \frac{dA}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) = \frac{D\pi}{2} \dot{D}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{\Delta (\pi D)}{\pi D} = \frac{\Delta (D)}{D}$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta D}{D} \right) = \frac{\dot{D}}{D}$$

$$\dot{A} = \frac{\pi D^2}{2} \cdot \dot{\epsilon}_T$$

$$\frac{\dot{A}}{A} = 2\dot{\epsilon}_T$$

Conforme exposto anteriormente, o parâmetro utilizado para avaliar a expansão ou retração da área durante o transiente é $\dot{A}/(A\dot{p})$. Para posteriores simplificações, torna-se importante associar a taxa de variação da deformação circunferencial ($\dot{\epsilon}_T$) com a taxa de variação da pressão (\dot{p}). Para tanto, deve-se considerar as situações possíveis de fixação da tubulação e seus decorrentes graus de liberdade. Três são as situações mais usuais, conforme exposto por **Wylie e Streeter**⁽¹⁶⁾:

- Tubulação ancorada somente na extremidade de montante.
- Tubulação ancorada contra movimento axial

- Tubulação ancorada, mas dotada de juntas de expansão intermediárias.

a - Primeira Situação (ancorado a montante)

$$\sigma_2 = \frac{T_f}{e} = \frac{\gamma H D}{2e} = \frac{pD}{2e}$$

$$\dot{\sigma}_2 = \frac{\dot{p}D}{2e}$$

$$\sigma_1 = \frac{pD}{4e}$$

$$\dot{\sigma}_1 = \frac{\dot{p}D}{4e}$$

$$\frac{\dot{A}}{A\dot{p}} = \frac{2}{\dot{p}} \dot{\epsilon}_T = \frac{2}{\dot{p}} (\dot{\epsilon}_2 - \mu \dot{\epsilon}_1) = \frac{2}{E\dot{p}} (\dot{\sigma}_2 - \mu \dot{\sigma}_1)$$

$$\frac{\dot{A}}{A\dot{p}} = \frac{D}{Ee} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right)$$

Que pode ser representada por:

$$\frac{\dot{A}}{A\dot{p}} = \frac{D}{Ee} \cdot C_1 \quad (\text{II.10})$$

Logo, o valor de C_1 para este caso é:

$$C_1 = \left(1 - \frac{\mu}{2}\right)$$

b - Segunda Situação (axialmente ancorado)

$$\epsilon_1 = 0$$

$$\sigma_1 = \mu \sigma_2$$

$$\sigma_2 = \frac{pD}{2e}$$

$$\frac{\dot{A}}{A\dot{p}} = \frac{2}{\dot{p}} \dot{\epsilon}_T = \frac{2}{\dot{p}E} (\dot{\sigma}_2 - \mu \dot{\sigma}_1)$$

$$\frac{\dot{A}}{A\dot{p}} = \frac{2}{\dot{p}E} (\dot{\sigma}_2 - \mu^2 \dot{\sigma}_2) = \frac{D}{Ee} (1 - \mu^2)$$

Logo, o valor de C_1 para este caso é:

$$C_1 = (1 - \mu^2)$$

c - Terceira Situação (uso de juntas de expansão)

$$\sigma_1 = 0$$

$$\sigma_2 = \frac{pD}{2e}$$

$$\frac{\dot{A}}{A\dot{p}} = \frac{2}{\dot{p}} \dot{\epsilon}_T = \frac{2}{\dot{p}E} (\dot{\sigma}_2 - \mu \dot{\sigma}_1) = \frac{D}{Ee}$$

Logo, o valor de C_1 para este caso é:

$$C_1 = 1$$

II.3.4 - Cálculo da Celeridade

Para determinação do valor da celeridade em função das características do fluido e da tubulação, aplicou-se a equação da continuidade num volume de controle formado por um tubo de comprimento L e secção A . Admitindo um fechamento de válvula no final desse tubo, a massa de fluido que penetra no volume de controle é igual a massa armazenada no VC, decorrente da deformação da tubulação e da compressão do fluido. Para melhor visualização do problema, vide Figura II.4.

Admitindo ser V_0 a velocidade de escoamento em regime permanente, e aplicando a conservação da massa no tempo $t = L/a$, tem-se:

Massa que entra no VC	=	Massa armazenada em VC, devido a defor- mação da tubulação	+	Massa armazenada em VC devido a compressão do fluido
--------------------------	---	--	---	---

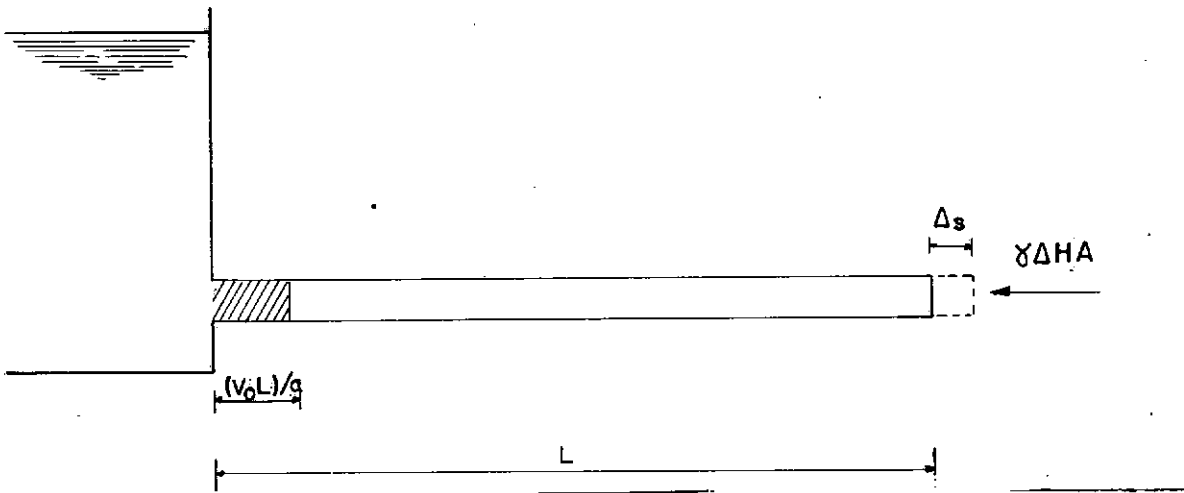


Figura II.4 — Volume de controle para cálculo da celeridade

$$\rho A V_0 \frac{L}{a} = (\rho L \Delta A + \rho A \Delta s) + L A \Delta \rho$$

$$\frac{V_0}{a} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta s}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$$\text{Como, } \frac{\Delta s}{L} \ll \frac{\Delta A}{A}, \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$$\frac{V_0}{a} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (\text{II.11})$$

Introduzindo (II.8) em (II.11), tem-se:

$$\frac{g \Delta H}{a^2} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$$\text{ou, } a^2 = \frac{\Delta p / \rho}{\Delta A / A + \Delta \rho / \rho} \quad (\text{II.12})$$

Introduzindo (II.9) em (II.12),

$$a^2 = \frac{K / \rho}{1 + K \Delta A / (A \Delta p)} \quad (\text{II.13})$$

Utilizando (II.10) e introduzindo em (II.13), tem-se:

$$a^2 = \frac{K / \rho}{1 + K \frac{D}{E e} c_1}$$

$$\text{ou, } a = \sqrt{\frac{K / \rho}{1 + K D c_1 / E e}} \quad (\text{II.14})$$

A equação acima calcula o valor da celeridade (a) em função das características do fluido transportado (K, ρ) e da tubulação (D, e, E, c₁).

II.4 - EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

Utilizando formulação proposta por **Propson** e apresentado em **Wylie e Streeter**⁽¹⁶⁾, considerou-se um volume de controle limitado pela parede da tubulação, tendo inicialmente um comprimento δx . Referenciando o sistema na face 1 do volume de controle, chamou-se de u a velocidade com que a face 1 se move.

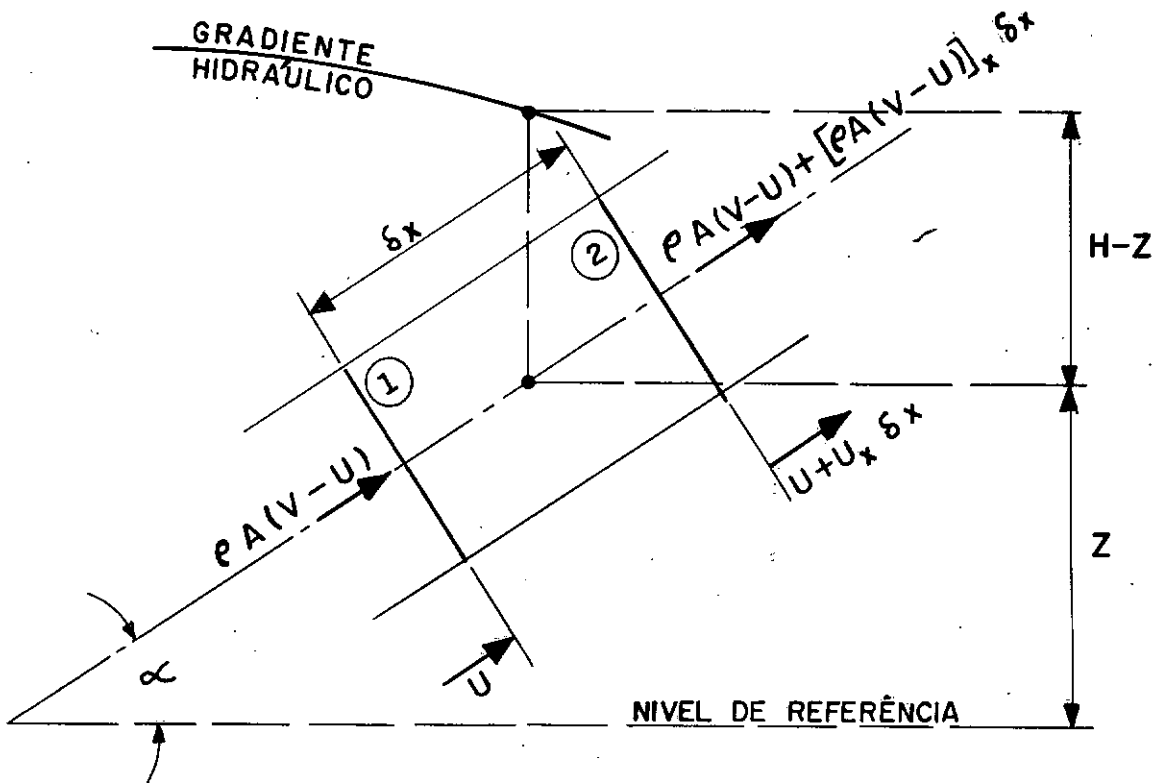


Figura II.5 — Volume de Controle

Pela equação da continuidade, a taxa de variação da massa na superfície do volume de controle é igual a taxa de variação interna ao volume de controle, ou seja:

$$- [\rho A(v-u)]_x \delta x = \frac{D}{Dt} (\rho A \delta x) \quad (\text{II.15})$$

Na equação (II.15) tem-se novamente um caso de derivada material, pois a taxa de variação se refere à massa inserida no volume de controle. Como o volume de controle é móvel, a massa $(\rho A \delta x)$ varia com o espaço e o tempo, portanto:

$$\frac{D(\rho A \delta x)}{Dt} = \frac{\partial (\rho A \delta x)}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial (\rho A \delta x)}{\partial t}$$

A velocidade dx/dt representa a velocidade com que o volume de controle se move, logo:

$$\frac{D(\rho A \delta x)}{Dt} = \frac{\partial (\rho A \delta x)}{\partial x} \cdot u + \frac{\partial (\rho A \delta x)}{\partial t} \quad (\text{II.16})$$

Expandindo (II.15) e utilizando (II.16), tem-se:

$$\begin{aligned} [-(\rho A v)_x + (\rho A u)_x] \delta x &= \rho A u \frac{\partial (\delta x)}{\partial x} + \delta x u (\rho A)_x + \rho A \frac{\partial (\delta x)}{\partial t} + \\ &+ \delta x (\rho A)_t \\ [-(\rho A v)_x + (\rho A u)_x] \delta x &= \rho A \left(u \frac{\partial (\delta x)}{\partial x} + \frac{\partial (\delta x)}{\partial t} \right) + \delta x u (\rho A)_x + \delta x (\rho A)_t \\ u \frac{\partial (\delta x)}{\partial x} + \frac{\partial (\delta x)}{\partial t} &= \frac{D}{Dt} (\delta x) = u_x \delta x \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

Utilizando (II.17), tem-se:

$$\begin{aligned} -(\rho A v)_x + (\rho A u)_x - \rho A u_x - u(\rho A)_x - (\rho A)_t &= 0 \\ -(\rho A)_x v - \rho A v_x + (\rho A)_x u + u_x \cdot \rho A - \rho A u_x - u(\rho A)_x - (\rho A)_t &= 0 \\ \rho A v_x + v(\rho A)_x + (\rho A)_t &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

Definindo $\frac{D}{Dt} = v \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t}$, como sendo a derivada substantiva ou material com relação ao movimento da partícula de massa, tem-se:

$$\frac{D}{Dt} (\rho A) = \rho \frac{D}{Dt} (A) + A \frac{D}{Dt} (\rho) = v(\rho A)_x + (\rho A)_t \quad (\text{II.19})$$

Substituindo (II.19) em (II.18) e utilizando a notação $\frac{D}{Dt}(A) = \dot{A}$ e $\frac{D}{Dt}(\rho) = \dot{\rho}$, tem-se:

$$\begin{aligned} \rho A v_x + \rho \dot{A} + A \dot{\rho} &= 0 \\ v_x + \frac{\dot{A}}{A} + \frac{\dot{\rho}}{\rho} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II.20})$$

A equação (II.20) representa o princípio de conservação da massa. O termo \dot{A}/A representa a deformação transversal da tubulação e $\dot{\rho}/\rho$ a compressibilidade do fluido durante o transiente. No regime permanente, estes dois termos são nulos, portanto a equação (II.20) se transforma em equação $v_x = 0$, que representa o princípio de conservação da massa para escoamentos unidimensionais em regime permanente ($\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$)

Introduzindo (II.9) em (II.20), tem-se:

$$v_x + \frac{\dot{A}}{A} + \frac{\dot{p}}{K} = 0$$

Utilizando (II.10) e introduzindo em (II.21), tem-se:

$$v_x + \frac{D}{Ee} c_1 \dot{p} + \frac{\dot{p}}{K} = 0$$

ou,

$$\frac{\dot{p}}{\rho} + \frac{v_x}{\frac{\rho}{K} \left[1 + \frac{K}{E} \cdot \frac{D}{e} \cdot c_1 \right]} = 0 \quad (\text{II.21})$$

Introduzindo o conceito da celeridade (II.14) em (II.21), tem-se:

$$\frac{\dot{p}}{\rho} + a^2 v_x = 0 \quad (\text{II.22})$$

A pressão (p) pode ser subdividida na pressão estática (p_e) e pressão dinâmica (p_d).

$$p_d = p - p_e = \rho g (H - Z) - p_e = \rho g H - (\rho g Z + p_e)$$

A taxa de variação \dot{p} apresentada na equação (II.22), representa a taxa de variação \dot{p}_d .

$$\dot{p}_d = \rho g \dot{H} \quad (\text{II.23})$$

Introduzindo (II.23) em (II.22), tem-se:

$$g \dot{H} + a^2 v_x = 0$$

$$\text{Como } \dot{H} = v H_x + H_t$$

Tem-se finalmente:

$$v H_x + H_t + \frac{a^2 v_x}{g} = 0 \quad (\text{II.24})$$

A equação (II.24) representa o princípio de conservação da massa com \underline{v} e \underline{H} como variáveis dependentes e \underline{x} e \underline{t} como independentes.

III - MÉTODOS NUMÉRICOS

III.1 - MÉTODOS NUMÉRICOS NORMALMENTE UTILIZADOS

As equações (II.7) e (II.24) formam um par de equações parciais hiperbólicas quasi-lineares representando o princípio da conservação da massa e da quantidade de movimento. Devido a presença de termos não-lineares nas equações, não é possível a determinação de soluções explícitas. Desta forma, diversos métodos numéricos foram propostos para a solução dessas equações. Estes métodos geram a solução em pontos específicos da tubulação.

Segundo Chaudry ⁽²⁾ dentre os métodos numéricos existentes, os mais utilizados para a solução das equações que governam os transientes hidráulicos são: o método das características e o método de diferenças finitas, implícito ou explícito. No método das características, as equações de derivadas parciais são inicialmente convertidas em equações diferenciais ordinárias, essas são então resolvidas pelo método das diferenças finitas. A característica representa o curso das perturbações, portanto, este é o método mais indicado para a solução de sistemas de equações diferenciais parciais hiperbólicas.

No método de diferenças finitas, as equações (II.7) e (II.24) são manuseadas diretamente por aproximações, resultando num conjunto de equações algébricas. Dependendo da forma como o termo de fricção é representado, as equações podem ser lineares ou não.

No método explícito, as derivadas parciais são substituídas por aproximações de diferenças finitas, tornando as va

riáveis a se determinar em certo instante, funções das variáveis conhecidas no instante anterior. No método implícito, as variáveis desconhecidas em determinado instante, são funções das variáveis conhecidas no instante anterior e das desconhecidas no presente instante (nas secções adjacentes). As equações para todo o sistema devem ser resolvidas simultaneamente.

III.2 - MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

III.2.1 - Transformação das Equações Diferenciais de Derivadas Parciais em Equações Diferenciais Ordinárias

Conforme deduzido no capítulo II, as equações que governam o fenômeno dos transientes hidráulicos, são:

- Equação do Movimento

$$L_1 = gH_x + vv_x + v_t + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (\text{II.7})$$

- Equação da Continuidade

$$L_2 = vH_x + H_t + \frac{a^2}{g} v_x = 0 \quad (\text{II.24})$$

Considerando uma combinação linear das 2 equações acima, tem-se:

$$L = L_1 + \lambda L_2$$

$$L = gH_x + vv_x + v_t + \frac{fv|v|}{2D} + \lambda (vH_x + H_t + \frac{a^2}{g} v_x) = 0$$

$$L = \lambda [H_x (v + \frac{g}{\lambda}) + H_t] + [v_x (v + \frac{a^2}{g} \lambda) + v_t] + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (\text{III.1})$$

Sendo λ uma constante qualquer, lhe será atribuído um valor de tal forma que:

$$v + \frac{g}{\lambda} = v + \frac{a^2}{g} \lambda$$

Logo,

$$\lambda = \pm \frac{g}{a}$$

Para $\lambda = \frac{g}{a}$, a equação (III.1) se transforma em:

$$\frac{g}{a} [H_x(v+a) + H_t] + [v_x(v+a) + v_t] + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (\text{III.2})$$

Para $\lambda = -\frac{g}{a}$, a expressão (III.1) se transforma em:

$$-\frac{g}{a} [H_x(v-a) + H_t] + [v_x(v-a) + v_t] + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (\text{III.3})$$

Utilizando a definição de derivada substantiva:

$$\frac{DH}{Dt} = \dot{H} = H_x \frac{dx}{dt} + H_t$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \dot{v} = v_x \frac{dx}{dt} + v_t$$

e fazendo $(v+a) = \frac{dx}{dt}$, a equação (III.2) se transforma na equação característica C^+ , válida somente ao longo das retas características do plano (x,t) fixados por $\frac{dx}{dt} = (v+a)$

Logo, tem-se a Equação Característica C^+

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (\text{III.4})$$

Fazendo $(v-a) = \frac{dx}{dt}$, a equação (III.3) se transforma na equação característica C^- , válida somente ao longo das retas características do plano (x,t) fixados por $\frac{dx}{dt} = (v-a)$.

Logo, tem-se a Equação Característica C^-

$$-\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (\text{III.5})$$

Considerando a aplicabilidade do presente trabalho (oleodutos), observa-se (conforme já exposto em II.3.1) que os valores da celeridade que se estabelecem no transiente são muito maiores que os valores usuais das velocidades de escoamento.

Considerando o acima exposto, as equações características se transformam em:

- Equação característica C^+ , válida para $\frac{dx}{dt} = + a$

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (\text{III.6})$$

- Equação característica C^- , válida para $\frac{dx}{dt} = - a$

$$- \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (\text{III.7})$$

As equações (III.6) e (III.7) representam o princípio de conservação da massa e da quantidade de movimento, da mesma forma que as equações (II.7) e (II.24). A diferença existente entre elas, está no fato das equações (II.7) e (II.24) serem válidas em todo plano (x,t) enquanto as (III.6) e (III.7) serem válidas somente ao longo das retas características, definidas pelas velocidades características $\frac{dx}{dt} = + a$ e $\frac{dx}{dt} = - a$. Matematicamente, as retas características dividem o plano (x,t) em regiões que possuem soluções diferentes. Fisicamente, essas retas determinam o curso das perturbações no plano (x,t) ⁽²⁾.

III.2.2 - Aplicação de Diferenças Finitas nas Equações de Diferenças Associadas

Para se solucionar o problema, substituiu-se as equações diferenciais ordinárias, por equações de diferenças associadas. Divide-se o oleoduto em N partes. Chamando-se de L o comprimento total do oleoduto, tem-se:

$$\Delta x = \frac{L}{N}$$

A solução do problema é mapeada no plano (x,t) , sendo o eixo dos x coincidente com o oleoduto. A solução numérica do problema é orientada ao longo das retas características deste plano (C^+ e C^-). O intervalo de tempo (Δt) a ser adotado, não pode ser qualquer, mas fixado pela relação $\Delta t = \Delta x/a$. Na Figura III.1 pode-se visualizar as retas características e os intervalos Δx e Δt .

Para a resolução do sistema de equações, em diferenças finitas, utilizou-se o método do "intervalo de tempo especificado". Este método mapeia o plano (x,t) em uma malha fixa, apresentando a vantagem de se conseguir uma solução ordenada no tempo e no espaço. Para a presente aplicação (fluidos praticamente incompressíveis e tubulações razoavelmente rígidas), a celeridade é praticamente constante. A malha do plano (x,t) é mantida fixa e simétrica ao longo de todo transiente.

Conhecendo as variáveis dependentes v e H no ponto A, (da figura a seguir), pode-se integrar a equação (III.6) ao longo de C^+ entre os limites A e P, obtendo H como função de v no ponto P. Da mesma forma, uma vez conhecido v e H em B, pode-se integrar a equação (III.7) ao longo de C^- entre os limites B e

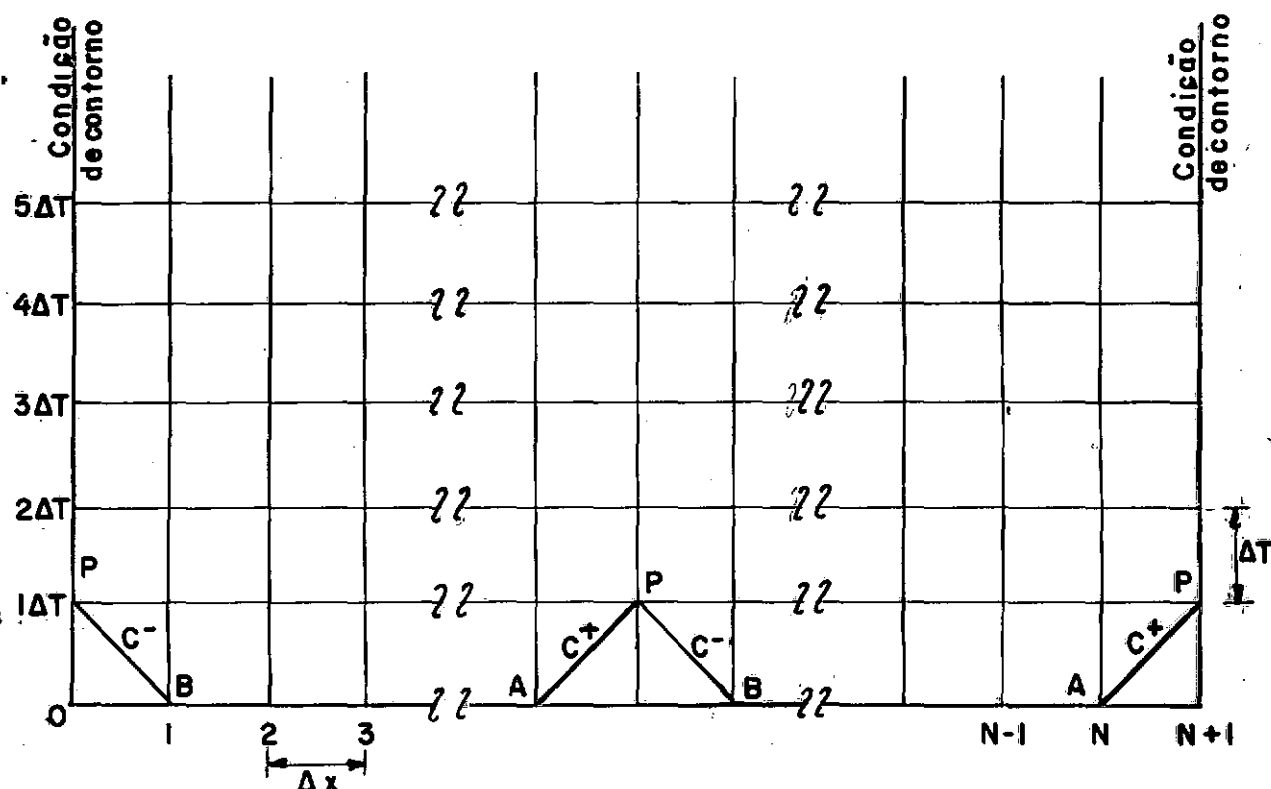


Figura III.1 — Plano (x,t) para solução do transiente

P, obtendo outra relação de v e H para o ponto P. Resolvendo o sistema, calcula-se o valor de H e v para o ponto P.

Multiplicando (III.6) por $adt/g = dx/g$ e substituindo a variável velocidade (v) pela variável vazão (Q), através da introdução da área (A) do tubo, obtem-se:

$$dH + \frac{a}{gA} dQ + \frac{f}{2gDA^2} Q|Q| dx = 0$$

Integrando ao longo de C^+ entre A e P, tem-se:

$$\int_{H_A}^{H_P} dH + \frac{a}{gA} \int_{Q_A}^{Q_P} dQ + \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_A}^{x_P} Q|Q| dx = 0$$

$$\text{ou,} \quad H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_A}^{x_P} Q|Q| dx = 0 \quad (\text{III.8})$$

Integrando ao longo de C^- entre B e P, tem-se

$$\int_{H_B}^{H_P} dH - \frac{a}{gA} \int_{Q_B}^{Q_P} dQ - \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_B}^{x_P} Q|Q|dx = 0$$

ou,

$$H_P - H_B - \frac{a}{gA} (Q_P - Q_B) - \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_B}^{x_P} Q|Q|dx = 0 \quad (\text{III.9})$$

Para a integração do termo de atrito (último termo das equações (III.8 e III.9), deve-se verificar que função exprime a variação da vazão com relação à posição (x) ao longo da integração. No item IV será efetuada a integração, utilizando aproximações de 1ª e 2ª ordem.

IV - DETERMINAÇÃO DA VAZÃO E PRESSÃO (HEAD) NOS PONTOS INTERIORES

IV.1 - CÁLCULO PELA APROXIMAÇÃO DE 1ª ORDEM

Neste sub-item do trabalho, utilizou-se a aproximação de 1ª ordem, a qual pode ser representada por:

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x) dx \approx f(x_0) (x_1 - x_0) \quad (\text{IV.1})$$

Aplicando (IV.1) em (III.8), tem-se:

$$H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_A |Q_A| = 0 \quad (\text{IV.2})$$

Aplicando (IV.1) em (III.9), tem-se:

$$H_P - H_B - \frac{a}{gA} (Q_P - Q_B) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_B |Q_B| = 0 \quad (\text{IV.3})$$

Define-se,

$$B = \frac{a}{gA} \quad \text{e} \quad R = \frac{f\Delta x}{(2gDA^2)}$$

Utilizando as definições acima, e aplicando-as em (IV.2) e (IV.3), obtém-se as seguintes equações algébricas.

$$C^+ : H_P = H_A - B (Q_P - Q_A) - RQ_A |Q_A| \quad (\text{IV.4})$$

$$C^- : H_P = H_B + B (Q_P - Q_B) + RQ_B |Q_B| \quad (\text{IV.5})$$

As equações (IV.4) e (IV.5) são apropriadas para utilização em computadores⁽¹⁾. Elas representam o princípio da conservação da massa e da quantidade de movimento para os pontos no plano (x,t) pertinentes às retas características.

A solução de um problema de transientes hidráulicos, usualmente se inicia com o regime permanente para o tempo $t = 0$.

A solução, consiste então em encontrar H e Q para todos os pontos P's das abcissas $t = 1\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t \dots$, até que o tempo de duração do fenômeno tenha sido coberto.

Visando a aplicação em programas de computador, utilizou-se a notação apresentada em Wylie e Streeter⁽¹⁶⁾. Inicialmente, indexou-se as N secções da tubulação com o subscrito (I). Chamou-se de H(I) e Q(I), o valor do head e da vazão de cada secção na condição inicial, ou disponível através de um passo precedente do programa. Os novos valores de head e vazão nos pontos interiores da tubulação, são determinados através da resolução simultânea das equações C^+ e C^- , e denominados de HP(I) e QP(I).

Utilizando a notação acima apresentada, as equações (IV.4) e (IV.5) se transformam em:

$$HP(I) = H(I-1) - B[QP(I) - Q(I-1)] - R.Q(I-1) | Q(I-1) | \quad (IV.6)$$

$$HP(I) = H(I+1) + B[QP(I) - Q(I+1)] + R.Q(I+1) | Q(I+1) | \quad (IV.7)$$

Agrupando os termos conhecidos da análise do transiente no intervalo de tempo anterior, ou conhecido do regime permanente inicial, tem-se:

$$CP = H(I-1) + B.Q(I-1) - R.Q(I-1) | Q(I-1) | \quad (IV.8)$$

$$CM = H(I+1) - B.Q(I+1) + R.Q(I+1) | Q(I+1) | \quad (IV.9)$$

Introduzindo (IV.8) e (IV.9) em (IV.6) e (IV.7), obtem-se:

$$C^+ : HP(I) = CP - B.QP(I) \quad (IV.10)$$

$$C^- : HP(I) = CM + B.QP(I) \quad (IV.11)$$

Solucionando o sistema acima, obtem-se:

$$HP(I) = (CP + CM) / 2 \quad (IV.12)$$

Aplicando a aproximação de 1ª ordem, calcula-se o valor do head (HP(I)) em todos os pontos interiores da tubulação pela equação (IV.12). Para o cálculo da vazão, uma vez conhecido o valor de HP(I), pode-se utilizar (IV.10) ou (IV.11).

IV.2 - CÁLCULO PELA APROXIMAÇÃO DE 2ª ORDEM

Em escoamentos nos quais a perda de energia devido a efeitos viscosos são preponderantes, a aproximação de 2ª ordem torna-se mais adequada. Em oleodutos, os termos de atrito são relevantes devido a viscosidade do produto transportado (normalmente de 10 a 200 vezes a viscosidade da água) e as longas distâncias vencidas.

A aproximação de 2ª ordem utilizada pode ser representada por:

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x) dx \approx f((x_1 + x_0)/2) \cdot (x_1 - x_0) \quad (\text{IV.13})$$

Aplicando (IV.13) em (III.8) e (III.9), obtém-se:

$$H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f\Delta x}{8gDA^2} (Q_A + Q_P) |Q_A + Q_P| = 0 \quad (\text{IV.14})$$

$$H_P - H_B - \frac{a}{gA} (Q_P - Q_B) - \frac{f\Delta x}{8gDA^2} (Q_B + Q_P) |Q_B + Q_P| = 0 \quad (\text{IV.15})$$

Utilizando as definições:

$$B = \frac{a}{gA} \quad \text{e} \quad R = \frac{f\Delta x}{(2gDA^2)}$$

As equações características C^+ e C^- passam a ser:

$$C^+ : H_P - H_A + B(Q_P - Q_A) + \frac{R}{4}(Q_A + Q_P) |Q_A + Q_P| = 0 \quad (\text{IV.16})$$

$$C^- : H_P - H_B - B(Q_P - Q_B) - \frac{R}{4}(Q_B + Q_P) |Q_B + Q_P| = 0 \quad (\text{IV.17})$$

Subtraindo (IV.17) de (IV.16), obtem-se:

$$H_B - H_A + B(2Q_P - Q_A - Q_B) + \frac{R}{4} [(Q_A + Q_P) |Q_A + Q_P| + (Q_B + Q_P) |Q_B + Q_P|] = 0 \quad (IV.18)$$

Utilizando a notação descrita em IV.1, e chamando a equação resultante de F, (IV.18) se transforma em:

$$F = H(I+1) - H(I-1) + B(2*QP(I) - Q(I-1) - Q(I+1)) + \frac{R}{4} [(Q(I-1) + QP(I)) * |Q(I-1) + QP(I)| + (Q(I+1) + QP(I)) * |Q(I+1) + QP(I)|] = 0 \quad (IV.19)$$

A equação (IV.19) define implicitamente o valor da nova vazão (QP(I)) em função das vazões nas secções adjacentes e intervalos de tempo anteriores Q(I-1) e Q(I+1). A solução de QP(I) poderá ser obtida através da utilização do método de **Newton-Raphson**. Após conhecido o valor de QP(I), pode-se obter HP(I) por (IV.10) ou (IV.11).

O método se propõe a determinar o valor de QP(I) que zere a equação (IV.19), ou seja, zere o valor da variável F. Inicialmente, estima-se QP(I) e calcula-se o valor de F. Para a nova estimativa, utiliza-se a correção baseada na relação:

$$F + \frac{dF}{d(QP(I))} \cdot \Delta QP(I) = 0 \quad (IV.20)$$

O valor da derivada da função F é:

$$\frac{dF}{d(QP(I))} = 2B + \frac{R}{2} (|Q(I-1) + QP(I)| + |Q(I+1) + QP(I)|)$$

O valor de $\Delta QP(I)$ obtido da equação (IV.20), é adicionado à estimativa anterior de QP(I) e novo cálculo de F é executado. O cálculo termina quando a diferença dos valores de F de 2 (duas) iterações consecutivas forem inferiores a um deteru

minado grau de precisão da solução.

IV.3 - ANÁLISE COMPARATIVA DAS APROXIMAÇÕES

O programa desenvolvido, admite 4 (quatro) opções para o cálculo dos valores do Head e da vazão nos pontos interiores do sistema.

Na 1ª e 2ª opção, calcula-se o valor das variáveis $HP(I)$ e $QP(I)$ pela aproximação de 1ª ordem, ou seja, pelas equações (IV.12) e (IV.10). A diferença existente entre as 2 (duas) opções consiste no método de cálculo do fator de atrito f . Na 1ª opção, o fator de atrito é mantido constante durante todo o transiente. Na 2ª opção, o fator de atrito é recalculado em todos os cálculos dos pontos interiores.

Escoamentos de fluidos de baixa viscosidade, (água, etc.) normalmente possuem alto Número de Reynolds. Pelo Ábaco de Moody, pode-se visualizar que esses escoamentos geralmente ocorrem na faixa de regimes parcialmente ou totalmente turbulentos. Nesses regimes de fluxo, o Número de Reynolds possui pequena influência sobre o fator de atrito f . Variações da velocidade com suas conseqüentes variações no Número de Reynolds, provocam pequenas variações no fator de atrito. Para esses escoamentos é razoável se adotar um f constante durante toda a duração do transiente.

Escoamento de fluidos de alta viscosidade (petróleo, óleos combustíveis, etc.) normalmente ocorrem na faixa de regime laminar, crítico, transição e parcialmente turbulento. Nesses regimes de fluxo, o Número de Reynolds influencia razoavelmente no fator de atrito f . Para esses escoamentos, torna-se

importante recalcular o fator de atrito durante o transcurso do transiente.

Na 3ª e 4ª opção, calcula-se o valor das variáveis $HP(I)$ e $QP(I)$ pela aproximação de 2ª ordem, ou seja, pela equação (IV.19) resolvida por **Newton-Raphson** e (IV.10). Da mesma forma que entre a 1ª e 2ª opção, a diferença existente entre a 3ª e 4ª, consiste no método de cálculo do fator de atrito. Na 3ª opção, o fator de atrito é mantido constante, enquanto na 4ª opção o f é recalculado em todos pontos interiores.

Com o intuito de efetuar uma análise comparativa das aproximações utilizadas para o cálculo do termo de atrito, foram efetuados cálculos de transientes hidráulicos em um oleoduto hipotético. Os cálculos foram executados através do programa TRANSH, sendo os resultados apresentados em 3 (três) gráficos. O esquema básico do oleoduto hipotético se encontra na Figura IV.1.

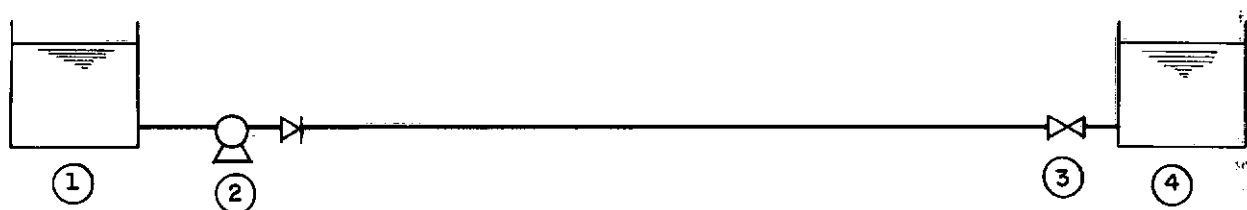


Figura IV.1 — Esquema básico do oleoduto utilizado para análise comparativa das aproximações

- (1) e (4) - Reservatórios a nível constante
- (2) - Bomba centrífuga com válvula de retenção
- (3) - Válvula de bloqueio

As seguintes premissas foram adotadas:

Comprimento	- 140 km
Diâmetro	- 508 mm
Espessura	- 6 mm
Produto transportado	- Petróleo
Viscosidade	- 50 cst
Curva da bomba	- Para Vazão = 0, Head = 700 mcl
	Vazão = 200 m ³ /h, Head= 620 mcl
	Vazão = 500 m ³ /h, Head= 500 mcl
Transiente provocado	- Fechamento da válvula do bloqueio (3)
	com oleoduto em operação
Tempo de fechamento da vv	- 60 seg

Análise do Gráfico IV-1

O gráfico IV.1 analisa a influência do número de divisões do oleoduto no valor do Head a montante da válvula (3). Para esse cálculo admitiu-se sempre a aproximação de 1ª ordem com fator de atrito mantido constante durante o transiente.

Analizando o gráfico, verifica-se que após determinado número de secções discretizantes, o resultado do transiente calculado permanece constante. Pela análise do gráfico, conclui-se não ser necessário discretizar esse oleoduto em mais de 56 secções.

O número ótimo de discretizações do oleoduto, pode ser obtido pelo procedimento utilizado, ou seja, executar cálculos consecutivos com nº de secções distintas e crescentes, de forma a determinar o número a partir do qual o resultado do cálculo permanece razoavelmente constante.

Análise do Gráfico IV.2

O gráfico IV.2 analisa a influência da aproximação utilizada na determinação do termo de atrito, no valor do Head a montante da válvula 3. Para esses cálculos, o oleoduto foi dividido em 14 secções. No 1º cálculo admitiu-se aproximação de 1ª ordem com f constante. No 2º admitiu-se aproximação de 1ª ordem com f recalculado para todas iterações de cálculo dos pontos interiores. No 3º cálculo admitiu-se aproximação de 2ª ordem com f recalculado nos pontos interiores.

Analisando as 3 (três) curvas traçadas, pode-se concluir:

- a - Recalcular o f , isto é, considerar mais realisticamente os efeitos viscosos no transiente, redundando em considerar maiores efeitos de amortecimento;
- b - O cálculo pela aproximação de 2ª ordem resultou em valores de Head superiores aos obtidos pela aproximação de 1ª ordem. Isto significa que a utilização da aproximação de 1ª ordem com pequeno número de divisões pode levar a resultados não conservativos.

Análise do Gráfico IV.3

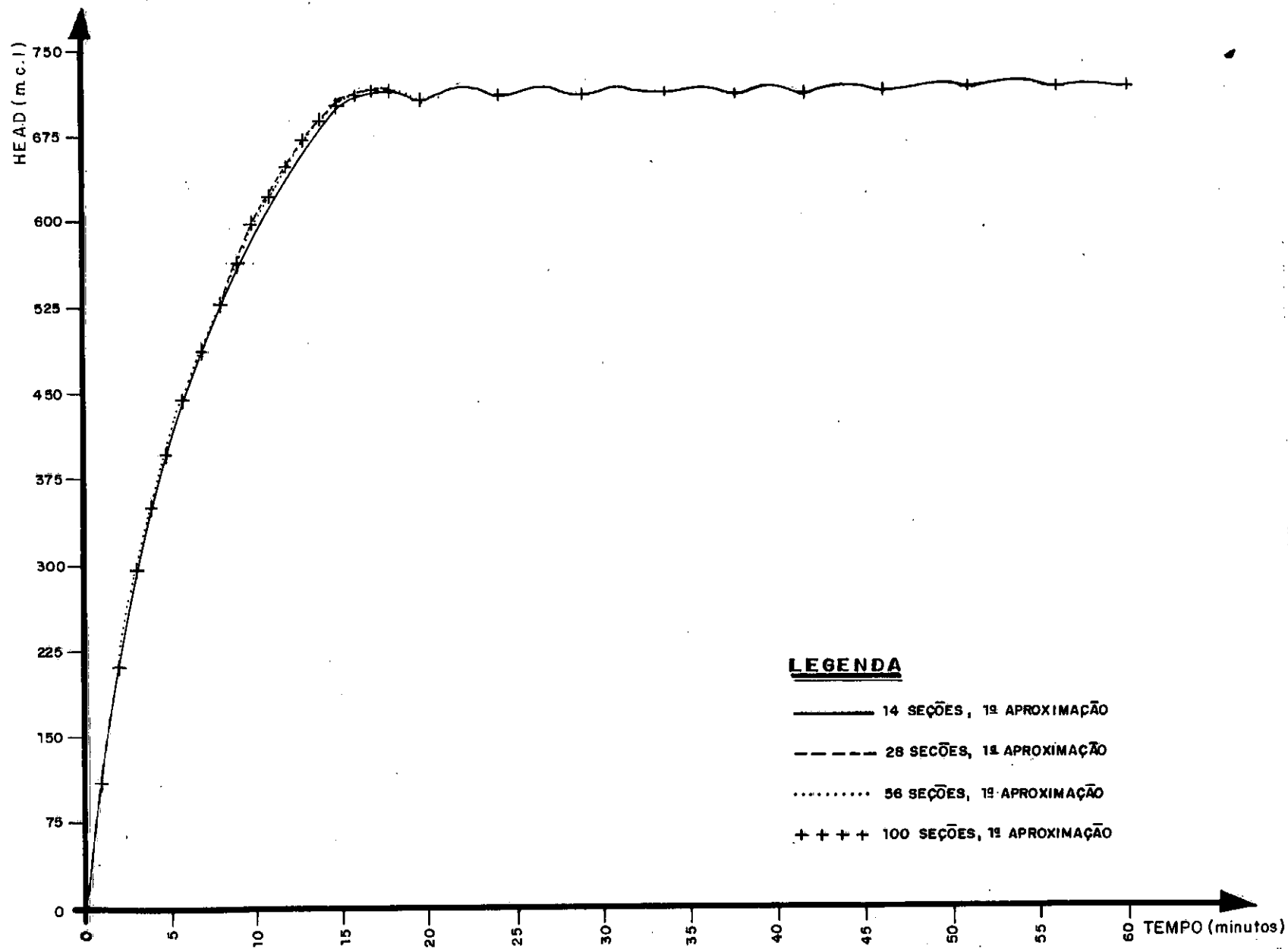
O gráfico IV.3 analisa a influência da aproximação utilizada na determinação do termo de atrito, conjugada com a variação do número de divisões do oleoduto.

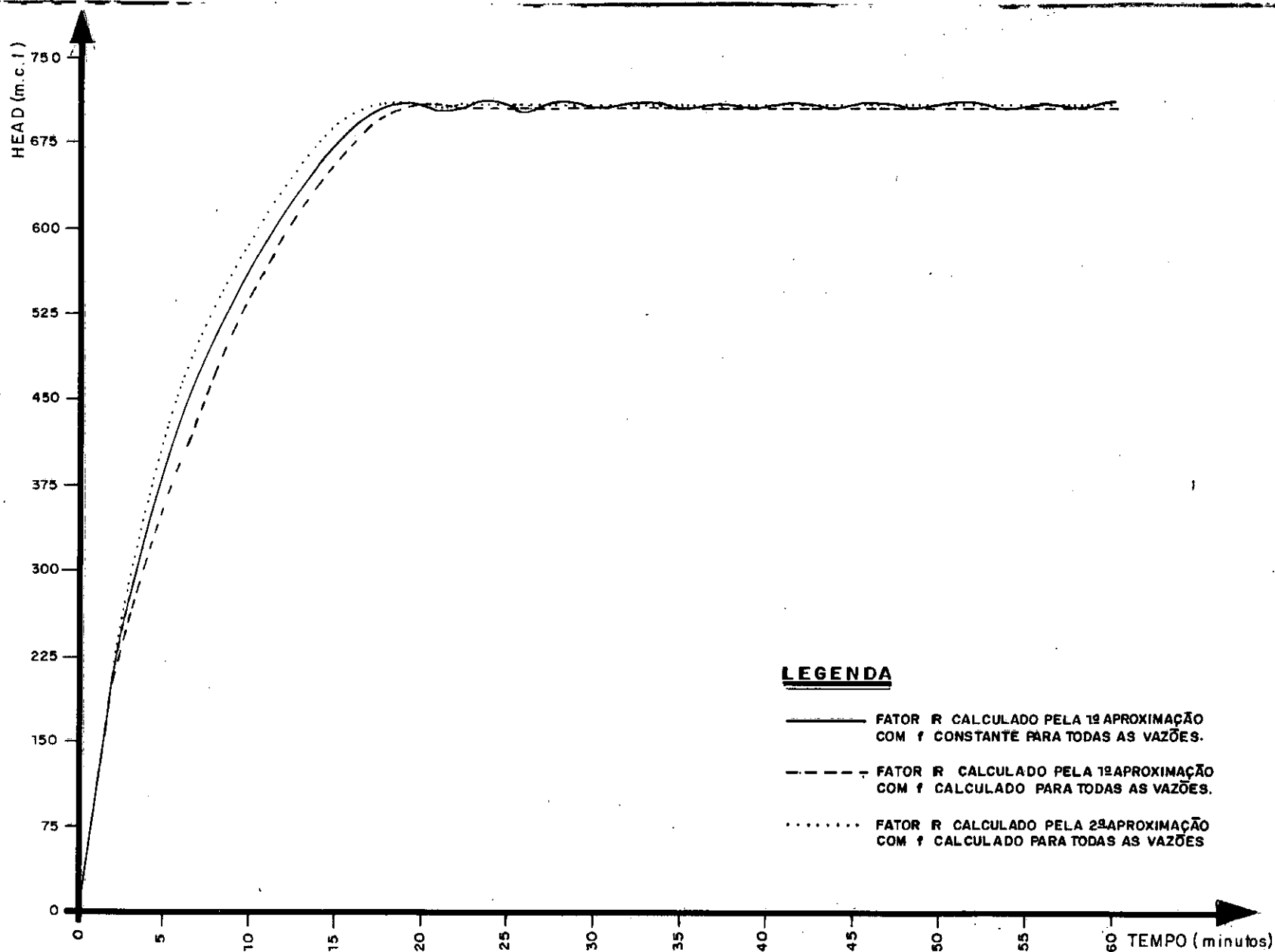
Foram apresentadas 4 curvas relativas aos 4 cálculos executados a saber: Divisão do oleoduto em 100 secções conjugada

com a utilização da aproximação de 1ª ordem, 14 secções conjugada com aproximação de 2ª ordem, 28 secções com aproximação de 2ª ordem e 56 secções com aproximação de 2ª ordem.

Analizando o gráfico, verifica-se que 3 das curvas traçadas são praticamente coincidentes. Pode-se concluir:

- a - A utilização de um grande número de secções discretizantes do oleoduto (100) admitindo aproximação de 1ª ordem, possui a mesma precisão que a utilização de um pequeno número de secções (28), admitindo aproximação de 2ª ordem;
- b - Adotando-se aproximação de 2ª ordem, não é necessário utilizar um grande número de secções discretizantes.





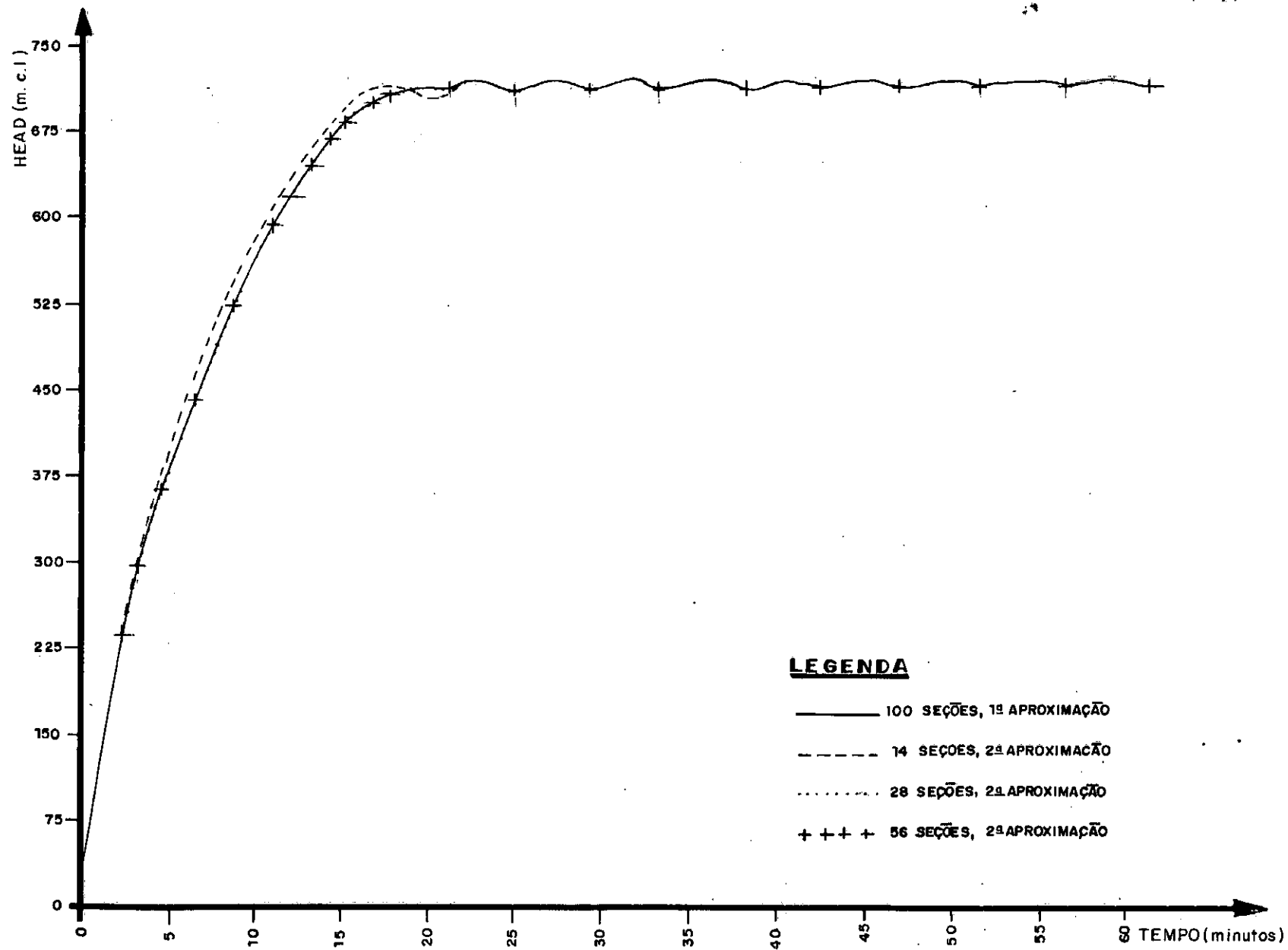


Gráfico IV.3 — Análise da influência da ordem de aproximação do cálculo do termo de atrito

V - DETERMINAÇÃO DA VAZÃO E PRESSÃO (HEAD) NOS CONTORNOS DO SISTEMA

V.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Examinando a malha ($\Delta t \times \Delta x$) da Figura V.1, observa-se que os valores H e Q dos pontos interiores (secções 2 a N), podem ser determinados pelas equações desenvolvidas no Capítulo IV. Caso se utilize a aproximação de 1ª ordem, deve-se utilizar as equações (IV.12 e IV.10), caso se opte pela aproximação de 2ª ordem, deve-se usar (IV.19) e (IV.10). Essas equações exprimem o princípio de conservação da massa e da quantidade de movimento.

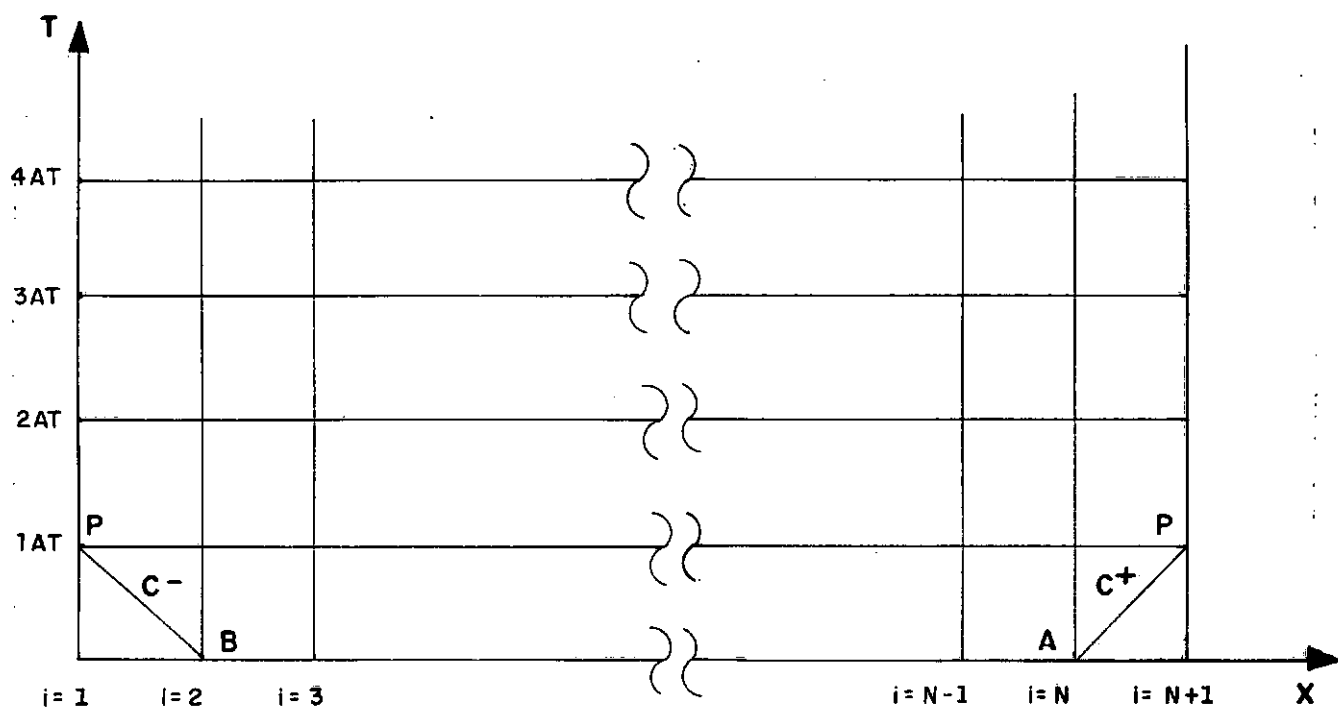


Figura V.1 — Malha $\Delta t \times \Delta x$

Para se determinar o valor do Head e vazão nas secções (1 e N+1), somente se dispõe de 1 (uma) equação deduzida pelos princípios de conservação. A outra equação deve ser determinada através da análise do comportamento do contorno do sistema. Essa análise deve redundar na especificação de H_p ou Q_p , ou uma relação entre estes, resultando em uma equação auxiliar adicional, comumente denominada de "condição de contorno". A solução do valor do Head e da vazão nas secções externas, deve ser determinada através da equação auxiliar do extremo, associado a sua respectiva equação característica (C^+ ou C^-).

Diversas são as condições de contorno usuais em sistemas hidráulicos. Essas condições são caracterizadas pela presença de equipamentos (bombas, válvulas, etc.), reservatórios (nível constante ou variável), estruturas de controle (one-way surge tank, chaminé de equilíbrio, vasos hidropneumáticos, válvulas de alívio, etc.), entroncamentos de tubulações, etc. Qualquer condição de contorno pode ser modelada e inserida na solução do transiente hidráulico, bastando para isto que o comportamento do equipamento ou da nova condição, seja especificada através de uma relação entre H e Q .

O programa de computador desenvolvido (TRANSH), possui uma estrutura central associada a diversos apêndices. Nessa estrutura central são calculadas as variáveis fixas e os pontos interiores do sistema. Os apêndices calculam as condições de contorno. No programa, somente foram inseridos os apêndices relativos aos equipamentos normalmente encontrados em oleodutos. Outras condições de contorno poderão ser, eventualmente, inseridas através da criação de novos apêndices.

Devido às características do produto transportado (in-

flamabilidade, vaporização, custo, etc.), diversas estruturas de controle normalmente utilizadas em adutoras (chaminés de equilíbrio, tanques uni-direcionais, etc.), não são utilizadas em oleodutos. O equipamento tradicionalmente utilizado para "limitar" as pressões durante o transiente hidráulico de oleodutos, são as válvulas de alívio.

O croquis apresentado na Figura V.2, representa os equipamentos modelados pelo TRANSH.

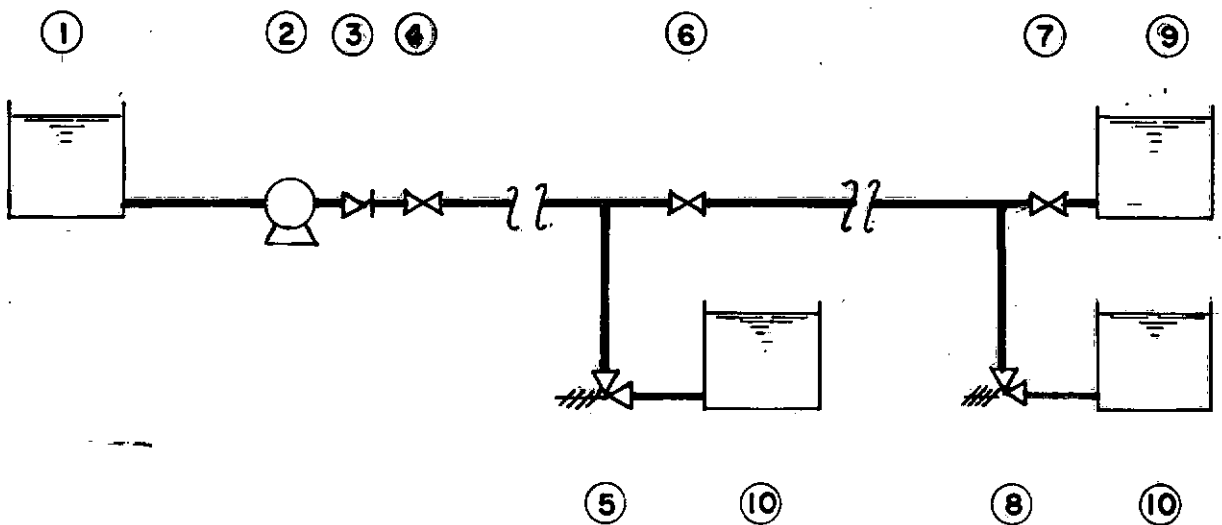


Figura V.2 — Croquis representando as instalações e equipamentos modelados pelo TRANSH

- ① Reservatório de sucção à nível constante.
 - ② Bomba centrífuga.
 - ③ Válvula de retenção.
 - ④ Válvula de bloqueio na descarga da bomba.
 - ⑤ Válvula de alívio intermediária.
 - ⑥ Válvula de bloqueio intermediária.
 - ⑦ Válvula de bloqueio à montante do reservatório de recebimento.
 - ⑧ Válvula de alívio.
 - ⑨ Reservatório de recebimento.
 - ⑩ Reservatório auxiliar para descarga de alívio.
-

O grau de complexidade das modelações matemáticas utilizadas para cada condição de contorno, foi norteadado pela sua necessidade e importância no cálculo de transientes hidráulicos em oleodutos. Assim, as formulações utilizadas podem ser inadequadas na análise da parada de bombas de adutoras de curta extensão.

Nos sub-itens seguintes, se encontram reportadas as modelações matemáticas dos equipamentos representados no croquis acima. No desenvolvimento, foi considerada para a equação característica, a aproximação de 1ª ordem.

V.2 - RESERVATÓRIO A NÍVEL CONSTANTE

Em reservatórios de grande capacidade (tanques de pe-

trôleo), o valor da elevação do gradiente hidráulico (Head), pode ser considerado constante ao longo do transiente. Essa condição de contorno pode ser definida especificando o valor do Head da seguinte forma:

$$HP(I) = HR$$

onde, HR = Head (Altura estática) do reservatório.

O valor da vazão pode ser determinado por (IV.10) ou (IV.11) dependendo da equação característica a ser utilizada. Para o tanque (9) do croquis anterior, utiliza-se (IV.10). Logo:

$$QP(I) = \frac{CP - HP(I)}{B} = \frac{CP - HR}{B}$$

V.3 - VÁLVULA DE BLOQUEIO

A perda de carga localizada em acessórios de tubulação pode ser representada genericamente por:

$$\Delta H = K \frac{v^2}{2g} \quad (V.1)$$

Introduzindo a área (A) na equação (V.1) e definindo K' como $\sqrt{1/K}$, tem-se:

$$\Delta H = \frac{1}{K'^2} \cdot \frac{Q^2}{2A^2g}, \quad \text{ou}$$

$$Q = K'A \sqrt{2g\Delta H}$$

Denominando $K_0 = K'A$, para a situação de regime permanente, tem-se:

$$Q_0 = K_0 \sqrt{2g\Delta H_0} \quad (V.2)$$

onde, Q_0 = Vazão de Regime Permanente

ΔH_0 = Diferencial de Head em Regime Permanente

K_0 = Coeficiente de descarga da válvula para a condição de regime permanente

Durante o transiente, para uma posição genérica de abertura da válvula de bloqueio, tem-se:

$$Q = K \sqrt{2g\Delta H} \quad (V.3)$$

Dividindo (V.3) por (V.2), tem-se:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{K}{K_0} \sqrt{\frac{\Delta H}{\Delta H_0}}, \quad \text{ou}$$

$$Q = \frac{K}{K_0} \cdot \frac{Q_0}{\sqrt{\Delta H_0}} \cdot \sqrt{\Delta H}$$

Define-se $\tau = K/K_0$, representando um valor adimensional que retrata a razão entre o coeficiente de descarga da válvula em determinada posição do transiente e o coeficiente em regime permanente.

$$\text{Logo,} \quad Q = \tau \frac{Q_0}{\sqrt{\Delta H_0}} \sqrt{\Delta H} \quad (V.4)$$

Para regime permanente, $\tau = 1$. Para a válvula fechada, correspondente ao fluxo nulo, $\tau = 0$. Para válvulas fechando o τ decresce (varia de 1 a 0). Para válvulas abrindo, o τ cresce, excedendo a 1 quando a válvula estiver mais aberta que na posição de regime permanente.

Utilizando a notação de Wylie and Streeter⁽¹⁶⁾, define-se o valor de C_v :

$$C_v = \frac{(Q_0 \tau)^2}{2\Delta H_0} \quad (V.5)$$

Introduzindo (V.5) em (V.4), tem-se:

$$Q^2 = 2C_v \Delta H$$

Utilizando a notação da programação:

$$QP(N)^2 = 2 * (HP(N) - HP(N+1)) * C_v \quad (V.6)$$

Para calcular o valor do C_v durante o transiente hidráulico, necessita-se avaliar o valor do τ da válvula. Obviamente este valor varia durante as operações de fechamento ou abertura. Diversas modelações existem na literatura a fim de se avaliar o valor do τ em função do tipo de válvula. Para o programa TRANSH, pode ser informada a lei de variação $\tau \times t/t_c$, ou utilizada a lei exponencial, que pode ser representada:

$$\tau = (1 - \frac{t}{t_c})^{Em}, \text{ onde:} \quad (V.7)$$

t = Intervalo de tempo entre o cálculo do transiente e o início de operação da válvula

t_c = Tempo de duração da operação da válvula

Em = Expoente, caracterizando o tipo da válvula.

Essa modelação possui distorções em relação ao fenômeno real. No cálculo de transientes hidráulicos de oleodutos, essas distorções redundam em pequenas diferenças nas avaliações das pressões advindas das operações de fechamento/abertura de válvulas de bloqueio.

Wood e Jones⁽¹⁵⁾, estudaram a variação da área de passagem das válvulas normalmente utilizadas nas instalações hidráulicas, em função de suas geometrias. Baseado nesse estudo, traçou-se o gráfico V.1, representando a variação de (A/A_0) em função de (t/t_c) . (A/A_0) representa a relação entre a área

de passagem da válvula durante o transiente e a área de passagem de regime permanente. O gráfico considerou uma manobra linear da válvula.

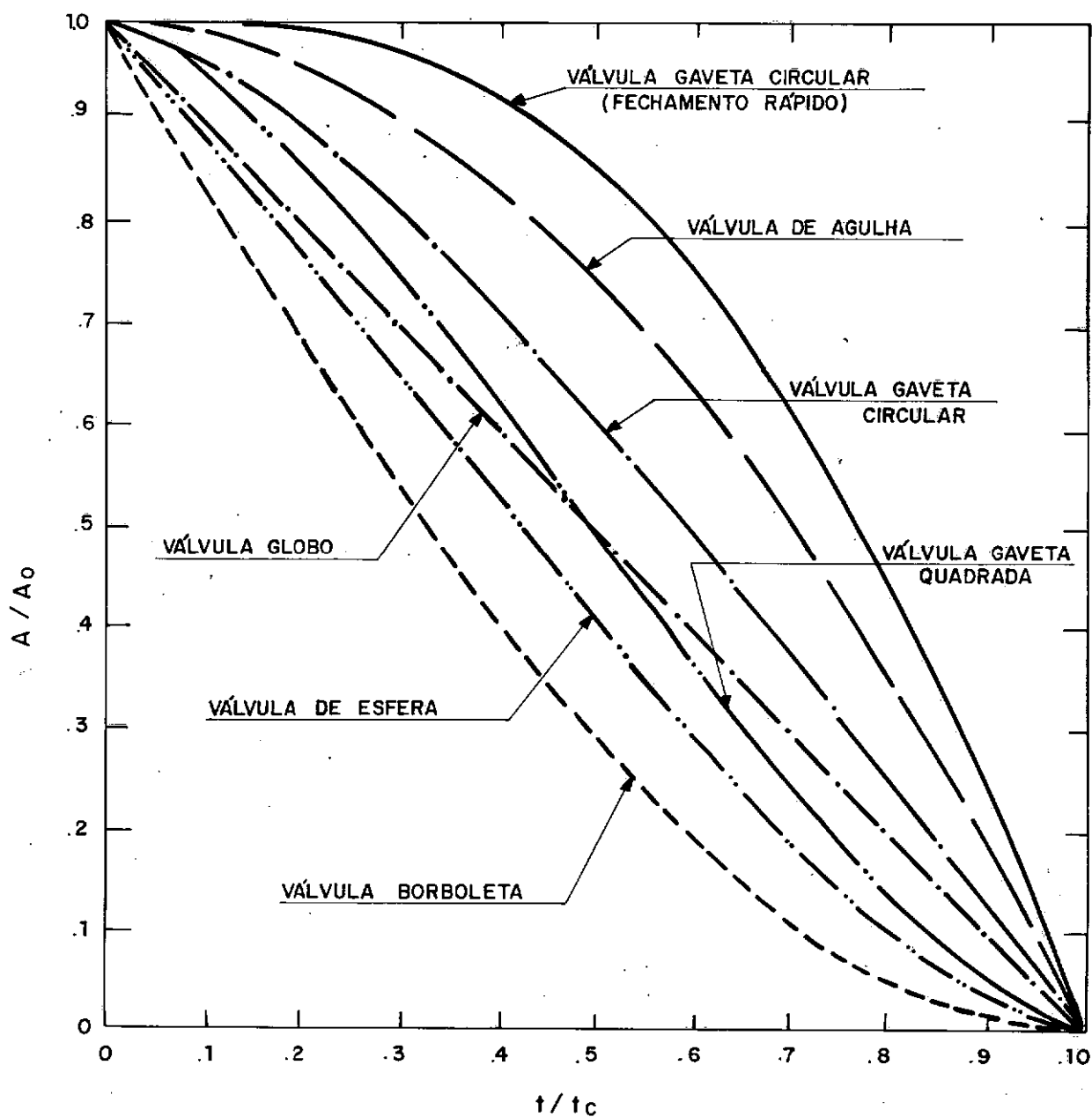


Figura V.3 — Variação de (A/A_0) em função de (t/t_c)

A relação entre os coeficientes de descarga pode ser grosseiramente aproximada pela relação entre as áreas de passagem da válvula (A/A_0). Admitindo a validade da afirmação acima, depreende-se que a figura (V.3) retrata a variação de (τ) em função de (t/t_c) .

Analisando o gráfico, determinou-se os coeficientes E_m que melhor traduzem a lei exponencial representada por (V.7). A análise levou aos seguintes resultados:

Tipo de válvula	Expoente (E_m)
Gaveta	0,75
Placa (throught-conduit)	1,0
Globo	1,0
Esfera	1,2
Borboleta	1,6

Outra modelação possível para a determinação de τ e prevista pelo programa TRANSH consiste em se informar a lei de variação $\tau \times t/t_c$. A curva é fornecida através de 9 (nove) pontos distintos relativos a $t/t_c = 0,1$, $t/t_c = 0,2, \dots t/t_c = 0,9$. A determinação do τ para valores intermediários é obtida através de interpolação linear. Este método de determinação, obviamente, possui maior precisão que a lei exponencial, porém, só é aplicável quando se conhecer a curva $(\tau \times t/t_c)$. Esta, nem sempre é disponível na literatura técnica, e dificilmente obtida na prática.

A equação (V.6), define uma relação entre a vazão na válvula ($QP(N)$) e o valor do ΔH para determinado instante do transiente. Objetivando determinar os valores de $QP(N)$ e $HP(N)$, deve-se lançar mão das equações características (IV.10) ou (IV.11) e de outras equações que descrevam o funcionamento dos

equipamentos instalados junto às válvulas (quando for o caso).

Para válvula de bloqueio instalada no final de oleodutos, conforme representado na Figura V.4, tem-se o sistema de equação:

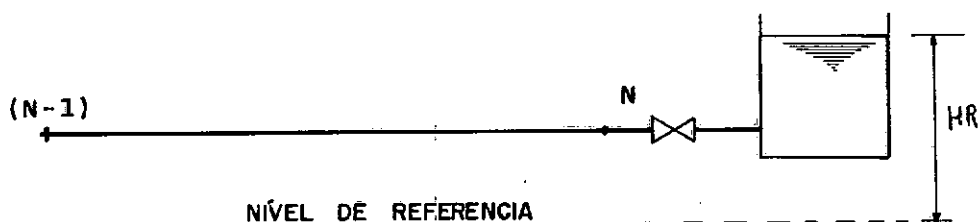


Figura V.4 — Esquema de válvula de bloqueio no final de oleodutos

$$\begin{cases} QP(N)^2 = 2 * (HP(N) - HR) * C_V & \text{Equação da válvula} \\ HP(N) = CP - B * QP(N) & \text{Equação característica} \end{cases}$$

Resolvendo o sistema, explicita-se o $QP(N)$:

$$QP(N) = -B.C_V + \sqrt{(B.C_V)^2 + 2C_V.CP + 2HR.C_V} \quad (V.8)$$

O valor de $HP(N)$, pode ser determinado por (IV.10).

$$HP(N) = CP - B * QP(N)$$

V.4 - INÉRCIA CONCENTRADA

Pequenos trechos de tubulação podem ser modelados pelo artifício da inércia concentrada. Esta simplificação considera trechos de tubulação como inelásticos e escoando fluidos in-

compressíveis. Em oleodutos, torna-se interessante a utilização da inércia concentrada, a fim de compatibilizar pequenos trechos de tubulação (sucção de bombas, descarga de PSV, etc), ao esquema geral da modelação do método das características.

A massa líquida é tratada como um sólido. A equação do movimento é aplicada ao trecho de tubulação considerado, descrevendo o comportamento do transiente.

Utilizando a notação de **Streeter**⁽¹⁶⁾, e a simbologia exposta na Figura V.5, a 2ª lei de Newton pode ser expressa por:

$$F_1 - F_2 - F_f = \frac{\gamma A_2 L_2}{g} \frac{dv}{dt} \quad (V.9)$$

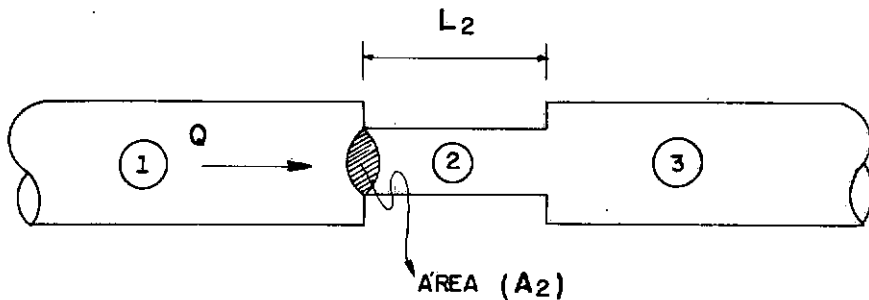


Figura V.5 — Elemento de Inércia Concentrada

onde,

F_1 = Força na face (1) do elemento

F_2 = Força na face (2) do elemento

F_f = Força de fricção (atrito)

Para a solução da equação (V.9), utilizou-se aproximação de 1ª ordem para o termo correspondente ao atrito (F_f) e 2ª ordem para os termos correspondentes às pressões nas extremidades do elemento de tubulação.

Utilizando a notação do programa TRANSH e as hipóteses citadas acima, a equação diferencial (V.9) passa a ser descrita algebricamente por:

$$\begin{aligned} & \gamma A_2 \left(\frac{HP(1)+H(1)}{2} - \frac{HP(3)+H(3)}{2} - \frac{f_2 L_2}{2gD_2 A_2^2} Q(2) |Q(2)| \right) = \\ & = \frac{\gamma A_2 L_2 (QP(2)-Q(2))}{gA_2 \Delta t} \\ & \text{Fazendo, } C_1 = H(3) - H(1) + \frac{f_2 L_2}{gD_2 A_2^2} Q(2) |Q(2)| - C_2 \cdot Q(2) \\ & C_2 = \frac{2L_2}{gA_2 \Delta t} \end{aligned} \quad (V.10)$$

A equação passa a ser:

$$HP(1)-HP(3) = C_1 + C_2 QP(2) \quad (V.11)$$

V.5 - BOMBAS

V.5.1 - Geral

A modelação completa do comportamento de bombas centrífugas em sistemas hidráulicos é bastante complexa. Durante um transiente, a máquina pode experimentar uma inversão de escoamento, de velocidade de rotação, ou de ambos. Uma análise das características completas das bombas centrífugas para análise de transientes, pode ser encontrada em **Martin**⁽⁷⁾.

Utilizou-se nesse trabalho, uma modelação bastante simplificada, considerando rotação da bomba constante e igual a de operação. Não se considerou inversão de fluxo e da rotação. Para oleodutos de grande extensão, estas simplificações são perfeitamente aceitáveis devido aos seguintes fatores:

- Presença de válvula de retenção à jusante da bomba, não permitindo a inversão do fluxo e conseqüentemente da rotação.

- Os tempos de aceleração dos conjuntos moto-bomba de oleodutos variam normalmente de 2 a 8 seg. Os transientes de oleodutos são razoavelmente lentos, utilizando-se diversas vezes intervalos de tempo de cálculo superiores a 8 seg. A influência de variação da rotação, nesse caso, nem seria detectada pelo método numérico utilizado.

O comportamento da bomba será simulado através do ajustamento de sua curva (H,Q) à uma equação parabólica do tipo;

$$H = H_S - COEF1.Q - COEF2.Q^2.$$

A solução do valor do Head (H) e vazão (Q) na bomba centrífuga, depende basicamente da forma como a bomba está conectada ao sistema hidráulico e do comportamento desta no transcurso do transiente, ou seja: bomba operando normalmente, desligada, partindo, ou desligando.

O programa TRANSH considerou (conforme pode ser visto na Figura V.2), a bomba sempre instalada entre o tanque de sucção e a válvula de retenção.

A tubulação de conexão entre o tanque de sucção e a bomba, será modelada como elemento de inércia concentrada. O sistema de equações utilizado para descrever o comportamento da bomba, dependerá da operação dessa no transcurso do transiente.

V.5.2 - Bomba Operando

Utilizando a notação do programa e a simbologia da Fi-

gura V.6, tem-se:

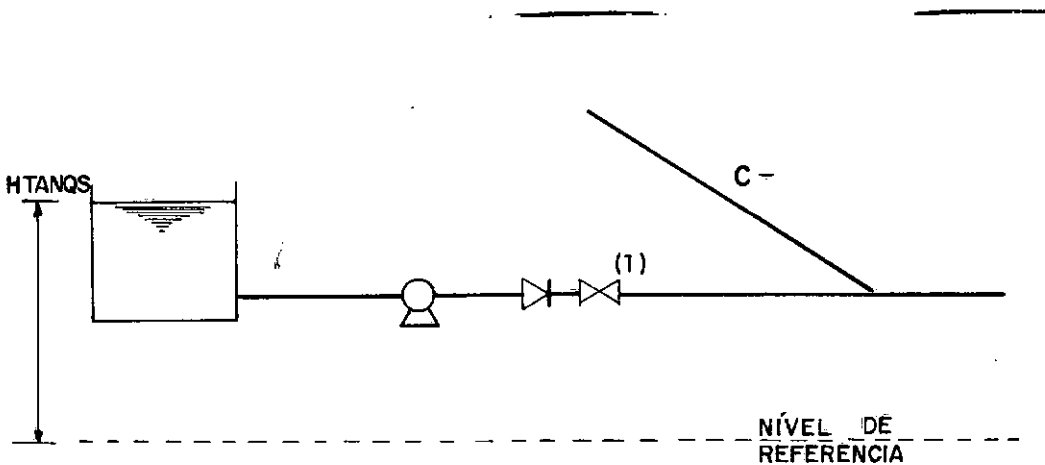


Figura V.6 — Croquis da instalação de bombas

$$\begin{cases} \text{HMBP} = \text{HTANQS} - C_1 - C_2 * \text{QMBP} \\ (\text{HP}(1) - \text{HMBP}) = \text{HS} - \text{COEF1} * \text{QMBP} - \text{COEF2} * \text{QMBP} ** 2 \\ \text{HP}(1) = \text{CM} + \text{B} * \text{QMBP} \end{cases}$$

onde:

HMBP = Head a montante da bomba

QMBP = Vazão a montante da bomba

C_1 e C_2 = Coeficientes definidos por (V.10)

COEF1 e COEF2 = Coeficientes para ajustamento da curva da bomba

HP(1) = Head na secção (1) do oleoduto

HS = Head de shutt-off (vazão zero) da bomba

CM e B = Coeficientes das equações características.

Solucionando o sistema, tem-se:

$$\text{QMBP} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

onde:

$a = \text{COEF2}$

$b = \text{COEF1} + C_2 + \text{B}$

$c = \text{CM} - \text{HTANQS} + C_1 - \text{HS}$

V.5.3 - Bomba Desligada

Caso a bomba esteja inserida na tubulação e fora de operação, o cálculo das vazões e head's durante o transcurso do transiente, passa a ser descrito pelo seguinte sistema:

$$\begin{cases} \text{HMBP} = \text{HTANQS} - C_1 - C_2 * \text{QMBP} \\ \text{HP}(1) = \text{HMBP} \\ \text{HP}(1) = \text{CM} + B * \text{QMBP} \end{cases}$$

Solucionando o sistema, tem-se:

$$\text{QMBP} = \frac{\text{HTANQS} - C_1 - \text{CM}}{B + C_2}$$

V.5.4 - Bomba Partindo com Válvula de Descarga Fechada

O sistema de equações é o descrito em (V.5.2) adicionado da equação (V.6), que descreve o comportamento da válvula de bloqueio.

$$\begin{cases} \text{HMBP} = \text{HTANQS} - C_1 - C_2 * \text{QMBP} \\ \text{HJBP} - \text{HMBP} = \text{HS} - \text{COEF1} * \text{QMBP} - \text{COEF2} * \text{QMBP} ** 2 \\ \text{HP}(1) = \text{CM} + B * \text{QMBP} \\ \text{HP}(1) - \text{HJBP} = \frac{1}{2 * C_v} \text{QMBP} ** 2 \end{cases}$$

onde: HJBP = Head a jusante da bomba

C_v = Coeficiente da válvula definido em (V.5)

Solucionando o sistema, tem-se:

$$\text{QMBP} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

onde: $a = \text{COEF2} - 1/(2 \cdot C_v)$

$b = B + C_2 + \text{COEF1}$

$c = CM + \text{HTANQS} + C_1 - HS$

V.6 - VÁLVULA DE ALÍVIO

V.6.1 - Considerações Gerais

O equipamento normalmente utilizado em oleodutos, para "limitar" as pressões advindas dos transientes hidráulicos, são as válvulas de alívio do tipo mola. Essas válvulas seguem as recomendações do API 520 "Recommended practice for the design and installation of pressure-relieving systems in refineries". Nesse trabalho, modelou-se a válvula de alívio não balanceada (convencional), que é mais comumente encontrada nos oleodutos.

Essas válvulas, são especificadas basicamente pela área de abertura ao fluxo e pressão de ajuste da mola (set-pressure). A modelação consiste em ajustar uma curva $H \times Q$ para essas válvulas. Determinados pontos notáveis desta curva já são previamente conhecidos, quais sejam: para pressões iguais ou inferiores a pressão de ajuste, a válvula está fechada, para pressão igual a 1,25 vezes a pressão de ajuste, a vazão pode ser calculada pela fórmula da Norma.

V.6.2 - Determinação da Curva $H \times Q$

Utilizando a fórmula (C-7) da Norma API 520, convertendo unidades, adotando algumas constantes e linearizando algumas curvas, chega-se a 2 (duas) fórmulas da $H \times Q$, em função

da: área de orifício da válvula, pressão de ajuste e pressão a jusante da válvula.

Para $H < 1,1 P_S$, tem-se:

$$H = 0,1667 \left(\frac{Q \times 563,8}{A \sqrt{1,25P_S - P_B}} \right) P_S$$

onde: Q = Vazão em (m³/seg)

G = Densidade

P_S = Pressão de ajuste da válvula em mcl

P_B = Pressão à jusante da válvula em mcl

A = Área de orifício da válvula em pol**2

Para $H > 1,1P_S$, tem-se:

$$H = 0,375 \left(\frac{Q \times 563,8}{A \sqrt{1,25P_S - P_B}} \right) P_S$$

As funções $H \times Q$ apresentadas acima, podem ser representadas num só gráfico da seguinte forma:

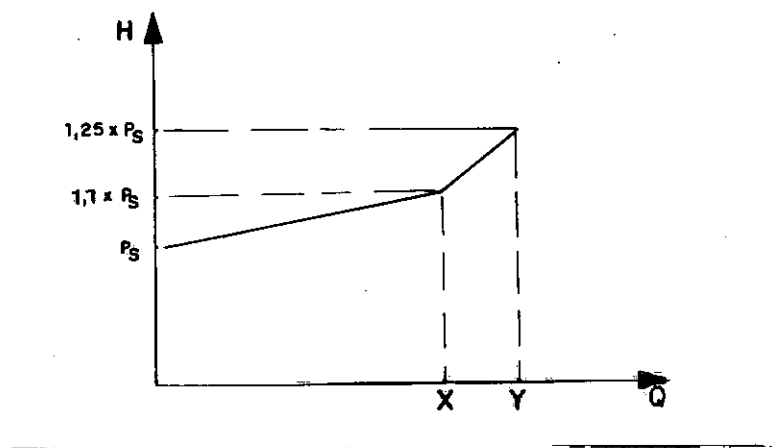


Figura V.7 — Curva $H \times Q$ das válvulas de alívio

onde: $X = 0,00117 \ A \sqrt{1,25P_S - P_B}$

$$Y = 0,0059 \ A \sqrt{1,25P_S - P_B}$$

V.6.3 - Estudo de Cavitação nas Válvulas de Alívio

Segundo a Norma API 520, as válvulas de alívio devem estar totalmente abertas quando a pressão na mesma exceder em 25% a pressão de ajuste da mola. Os fabricantes são obrigados a testar as válvulas em bancadas, de forma a reproduzir, na prática, as condições propostas. Em pressões superiores a 25% da pressão de "set", a válvula passa a operar como um orifício, não havendo comprovação experimental da operacionalidade das mesmas.

Não se encontra na literatura técnica, estudos de cavitação em válvulas de alívio. A prática operacional, mostra ser a operação destas bastante ruidosa e com presença de vibração, evidenciando uma operação dentro ou perto da região de cavitação.

Devido a ausência de maiores informações e estudos sobre o fenômeno da cavitação nessas válvulas, o presente trabalho considera, conservativamente, que em pressões acima de 1,25 vezes a pressão de ajuste da mola, a válvula cavita com bloqueio, estabelecendo vazão constante.

A função $H \times Q$ passa a ser representada pela Figura V.8.

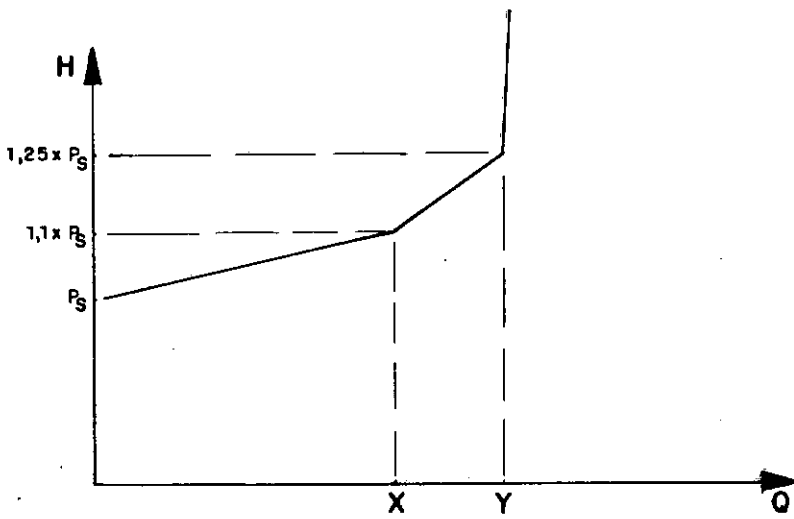


Figura V.8 — Curva H x Q das válvulas de alívio
considerando a cavitação

V.6.4 - Válvulas de Alívio no Final do Oleoduto

Normalmente as válvulas de alívio são instaladas no final do oleoduto, ou seja, junto às válvulas de bloqueio do parque de tanques de recebimento. A Figura V.9 representa o croquis dessas instalações.

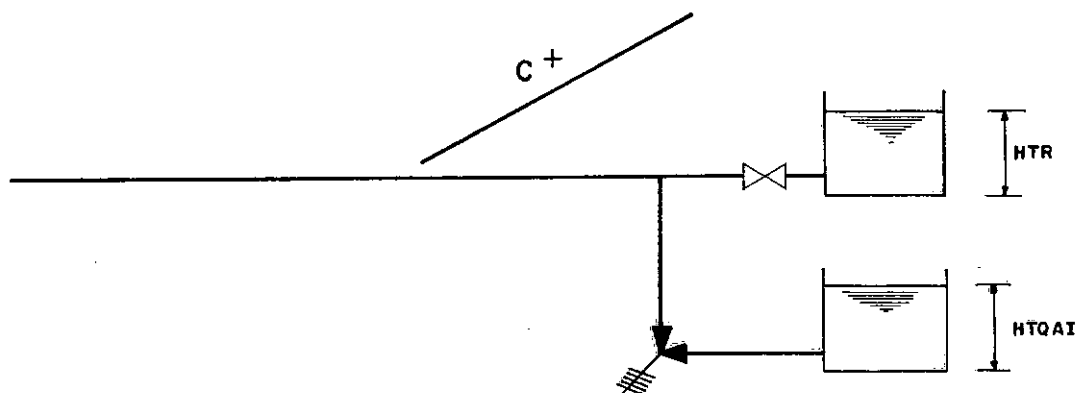


Figura V.9 — Croquis de válvula de alívio no final do oleoduto

Utilizando-se a notação do programa, obtem-se o seguinte sistema de equações:

$HPN = CP - B \cdot QPM$	Equação C^+
$HPN - HTR = \frac{1}{2C_v} \cdot QPJ^2$	Equação da válvula de bloqueio
$HPN = \left(0,1667 \left(\frac{QPA \times 563,8}{A \sqrt{1,25P_S - P_B}} \right) \right) P_S$	Equação da vv de alívio para $HPN < 1,1 P_S$
$HPN = \left(0,375 \left(\frac{QPA \times 563,8}{A \sqrt{1,25P_S - P_B}} \right) \right) P_S$	Equação da vv de alívio para $1,1P_S < HPN < 1,25 P_S$
$QPA = 0,0059 A \sqrt{1,25P_S - P_B}$	Equação da vv de alívio para $HPN \geq 1,25 P_S$
$P_B = HTQAI + C_1 + C_2 \cdot QPA$	Inércia concentrada a jusante da vv de alívio
$QPM + QPJ + QPA = 0$	Equação da continuidade no nó

onde, HTR = Altura do nível do líquido do tanque de recebimento

$HTQAI$ = Altura do nível do líquido do tanque de alívio

HPN = Head no nó

QPM = Vazão a montante do nó

QPJ = Vazão a jusante do nó

QPA = Vazão a jusante da válvula

P_B = Contra-pressão na válvula

O sistema acima, possui 5 equações com 5 incógnitas. O programa TRANSH, resolve o referido sistema através de um processo numérico de tentativas.

V.6.5 - Válvula de Alívio Intermediária

Com a finalidade de limitar as pressões nos oleodutos, diversas são as situações nas quais torna-se interessante instalar válvulas de alívio ao longo da tubulação. A Figura (V.10) apresenta o croquis dessas instalações.

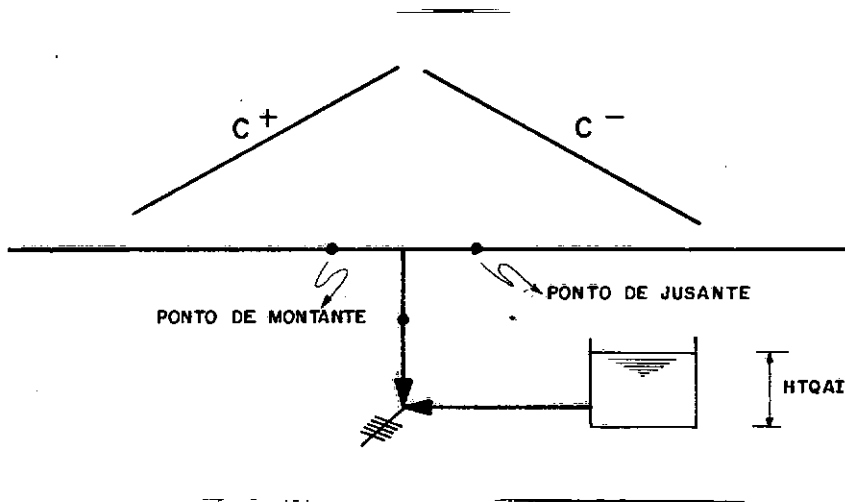


Figura V.10. — Croquis da válvula de alívio intermediária

Utilizando-se a notação do programa, obtém-se o seguinte sistema de equações.

$HPN = CP - B \cdot QPM$	Equação C^+
$HPN = CM + B \cdot QPJ$	Equação C^-
$HPN = \left(0,1667 \left(\frac{QPA \times 563,8}{A \sqrt{1,25P_S - P_B}} \right) P_S$	Equação da vv de alívio para $HPN < 1,1 P_S$
$HPN = \left(0,375 \left(\frac{QPA \times 563,8}{A \sqrt{1,25P_S - P_B}} \right) P_S$	Equação da vv de alívio para $1,1 P_S < HPN < 1,25 P_S$
$QPA = 0,0059 A \sqrt{1,25P_S - P_B}$	Equação da vv de alívio para $HPN \geq 1,25 P_S$
$P_B = HTQAI + C_1 + C_2 \cdot QPA$	Inércia concentrada a jusante da vv de alívio
$QPM + QPJ + QPA = 0$	Equação da continuidade no nó

V.7 - VÁLVULA DE BLOQUEIO INTERMEDIÁRIA

Em sistemas hidráulicos e particularmente em oleodutos, é usual se instalar válvulas de bloqueio ao longo da tubulação. A Figura V.11 representa o croquis destas instalações, indicando que a solução dos valores de H e Q ao longo do transiente se processa resolvendo o sistema de equações formado pelas equações características C^+ e C^- e pela equação que descreve o funcionamento da válvula.

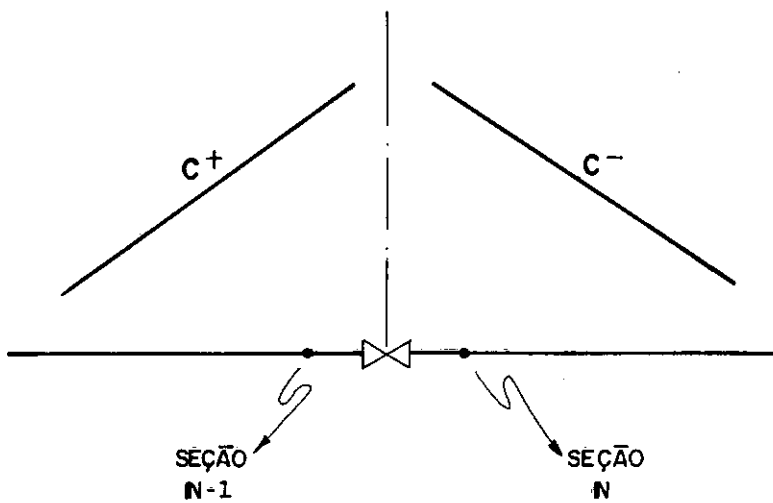


Figura V.11 — Croquis de válvula de bloqueio intermediária

O sistema de equações é representado abaixo utilizando-se a notação do programa:

$$\begin{cases} HP(N-1) = CP - B \cdot QP(N) & \text{Equação } C^+ \\ HP(N) = CM + B \cdot QP(N) & \text{Equação } C^- \\ HP(N-1) - HP(N) = \frac{1}{2C_v} \cdot QP(N)^2 & \text{Equação da válvula (V.6)} \end{cases}$$

Solucionando o sistema, chega-se à solução:

$$QP(N) = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

onde: $a = 1/(2 \cdot C_v)$

$b = -2 \cdot B$

$c = CM - CP$

VI - TRANSIENTES HIDRÁULICOS DETERMINÍSTICOS EM OLEODUTOS

VI.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Diversas são as situações transientes nas quais os sistemas hidráulicos operam. Consoante com o conceito de "manobra" introduzido no capítulo I e mencionado por Koelle^{(4) (5)}, essas situações correspondem às manobras efetuadas nos equipamentos constituintes das condições de contorno (válvulas, bombas etc.).

Dentre as diversas situações transientes, o programa TRANSH se limita a modelar aquelas que possuem relevância em oleodutos, tanto sob o aspecto de dimensionamento, quanto operacional.

Nos sub-itens a seguir, justifica-se a necessidade de se estudar os transientes modelados pelo programa (TRANSH). Será comentada a necessidade de maior avanço tecnológico na análise do fenômeno da separação de coluna, cuja modelação hoje existente na literatura técnica, não atende ao fenômeno encontrado em oleodutos.

VI.2 - OPERAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

As bombas centrífugas, são os equipamentos normalmente utilizados para transferência de energia aos oleodutos, com a finalidade de suprir as perdas por fricção e as diferenças de elevações.

No capítulo V, apresentou-se a modelação matemática uti

lizada na análise do comportamento destas.

O programa TRANSH, calcula o transiente hidráulico na partida ou parada de bombas. Para a partida, pode-se considerar a operação com válvula de bloqueio na descarga aberta, ou válvula fechada e abrindo simultaneamente a partida das bombas.

O cálculo dos transientes hidráulicos oriundos da operação das bombas, não é determinístico sob o ponto de vista de dimensionamento de equipamentos, mas sim do ponto de vista operacional e de definição de sistemas de proteção. Com este cálculo, pode-se responder a várias questões, exemplificando:

— Qual o tempo necessário para que o oleoduto fora de operação seja levado até o regime permanente?

— Há necessidade de se prever sistema de recirculação para a partida das bombas? Esse sistema se faz necessário quando o tempo gasto para levar o oleoduto até o regime permanente é incompatível com o tempo permissível para a operação das bombas, em vazões abaixo da vazão mínima de operação contínua.

— No desligamento das bombas, o oleoduto será submetido a pressões inferiores à pressão de vapor do produto transportado, originando a separação de coluna?

— Há necessidade de se retardar a atuação de instrumentos de proteção das bombas (pressostato de baixa pressão de sucção, chave de fluxo, pressostato de alta pressão de descarga etc?). Qual o ajuste de tempo?

VI.3 - FECHAMENTO DE VÁLVULA DE BLOQUEIO COM OLEODUTO EM OPERAÇÃO

O fechamento de válvula de bloqueio com o oleoduto em operação é o transiente hidráulico determinístico sob o aspecto de dimensionamento da tubulação.

Os oleodutos são dimensionados para a situação de regime permanente. O gradiente de pressão nesta situação está esquematizado na figura VI.1, mostrando ser a maior pressão do sistema à jusante da bomba e decrescendo até a pressão atmosférica encontrada no tanque da Estação de recebimento.

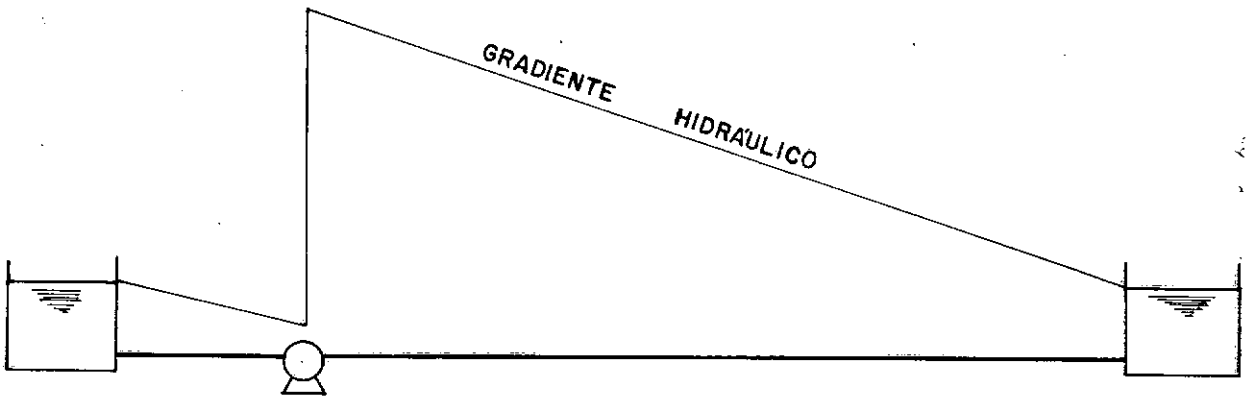


Figura VI.1 — Gradiente de pressão do oleoduto em regime permanente

A tubulação do oleoduto é "telescópica", ou seja, a espessura é dimensionada pela pressão variável e decrescente no sentido bomba/tanque de recebimento. Um fechamento de válvula com o oleoduto em operação, tenderá a igualar as pressões do oleoduto na pressão de "shutt-off" (vazão zero) da bomba, submetendo, eventualmente, a tubulação a pressões não admissíveis.

Para que isto não ocorra, são instaladas válvulas de alívio.

Exemplificaremos o acima exposto através do cálculo do transiente hidráulico durante o fechamento de válvula no final de um oleoduto hipotético de 140 Km. Pela figura VI.2, pode-se visualizar as envoltórias de pressão do oleoduto, caso não se instale válvulas de alívio no mesmo. No tempo 0 (zero) o oleoduto operava em regime permanente. Ao se iniciar o fechamento da válvula, as pressões do oleoduto aumentam, estabilizando-se em torno da pressão de "shutt-off" (vazão zero) da bomba, 18 minutos após o fechamento da válvula. Da análise da figura VI.2 pode-se concluir, que caso não se instale válvula de alívio neste oleoduto, o mesmo deverá ser totalmente dimensionado para uma pressão de 700 mcl.

A figura VI.3 analisa os envoltórios de pressão após o fechamento de válvula de bloqueio no final do mesmo oleoduto hipotético, porém, admitindo-se a existência de válvula de alívio junto a válvula de bloqueio que fechou. Pode-se notar o mesmo gradiente de pressão em regime permanente no tempo 0 (zero). As envoltórias de pressão para tempos superiores a 2 minutos após o fechamento da válvula, são diferentes, mostrando uma estabilização da pressão em novo regime permanente, após 12 minutos. O dimensionamento do oleoduto neste caso, deverá ser executado considerando as pressões do novo regime permanente estabelecido, ou seja, pressões variáveis de 500 mcl a 100 mcl.

Da análise comparativa das figuras VI.2 e VI.3, depreende-se ser o cálculo do regime transiente, fundamental para o dimensionamento da tubulação. Nesse dimensionamento faz-se necessário a consideração de todos os equipamentos pertinentes ao sistema oleoduto (bomba, válvulas de bloqueio, válvulas de alívio etc).

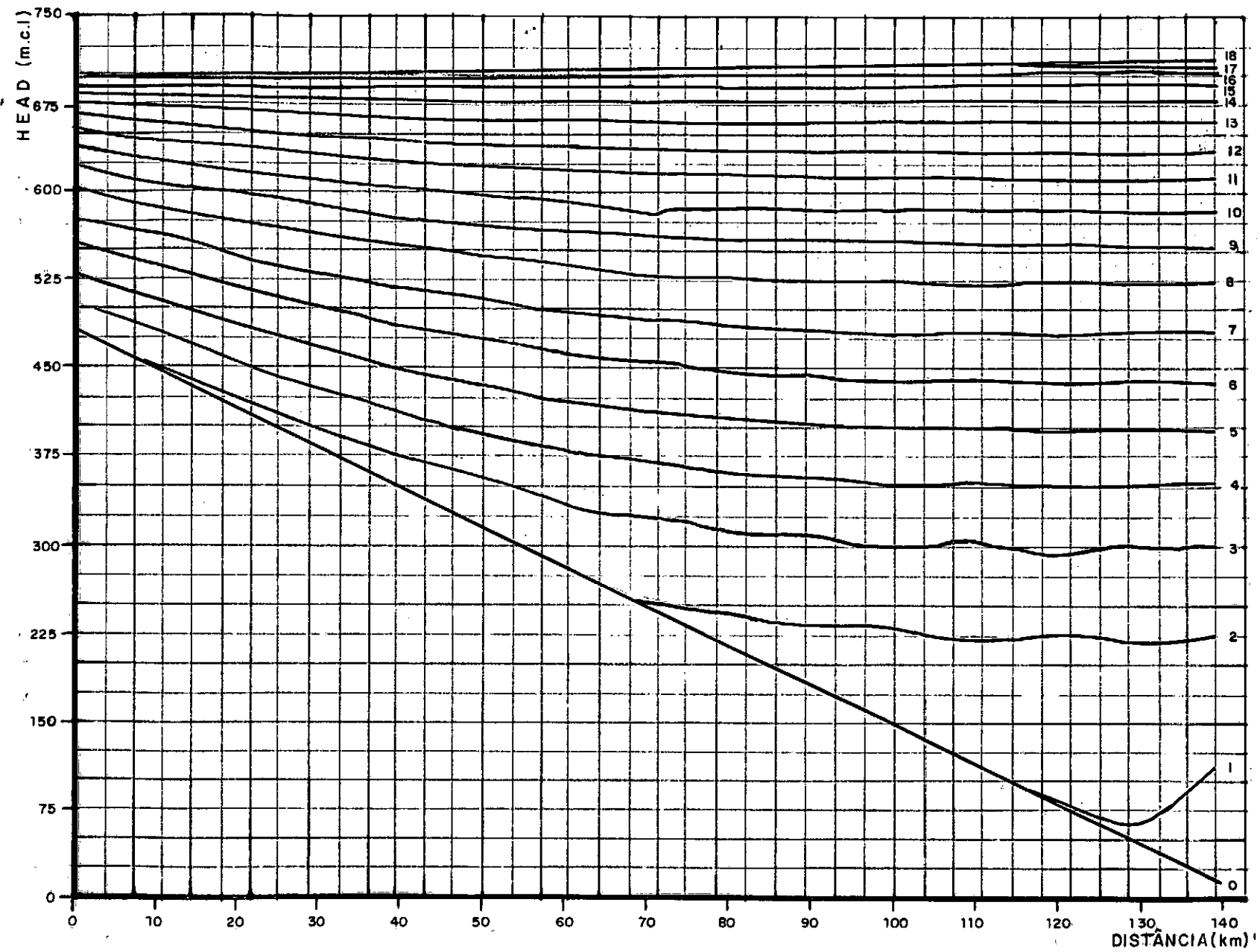


Figura VI.2 — Envoltórias de pressão para oleoduto projetado sem válvula de alívio

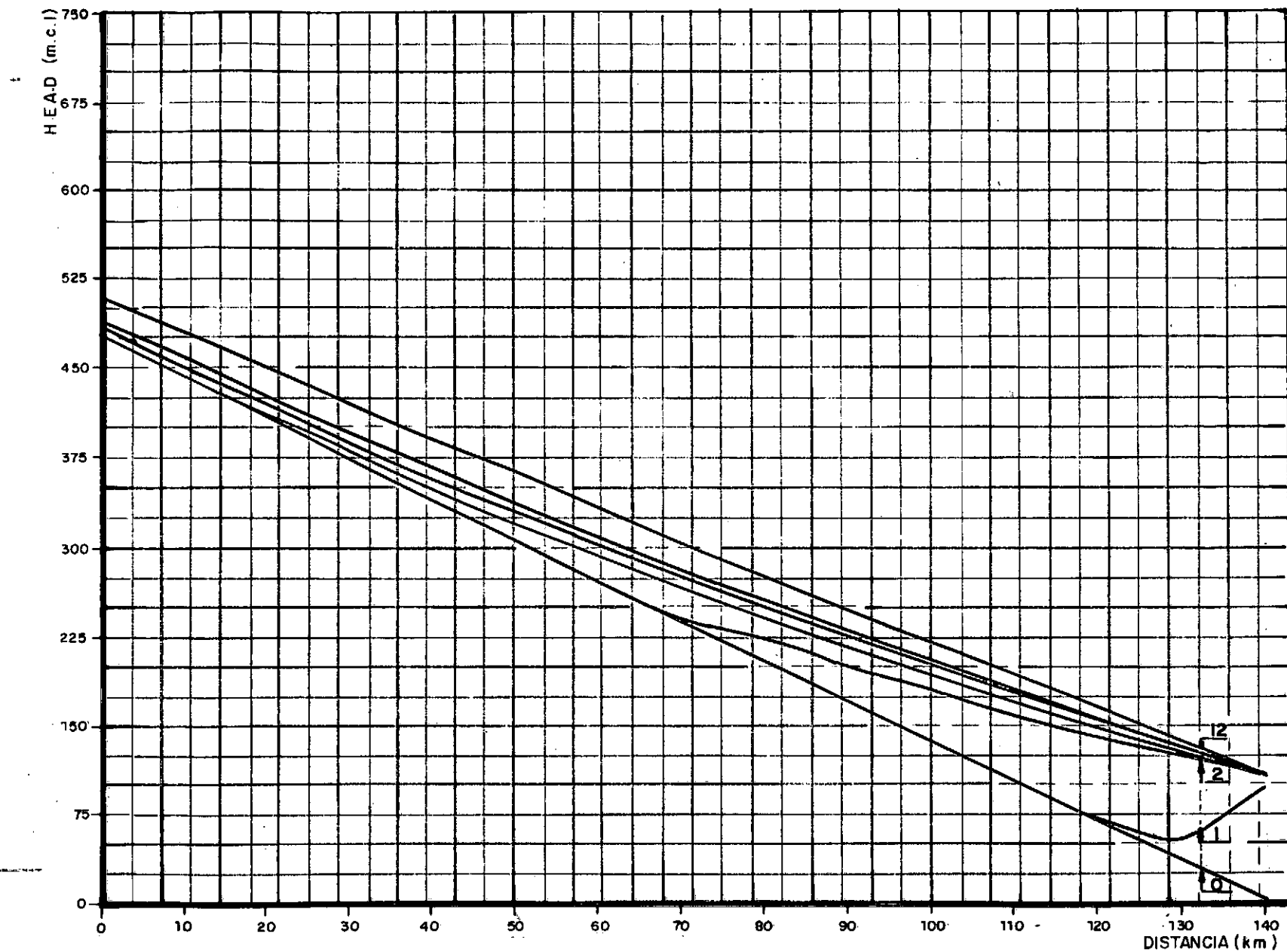


Figura VI.3 — Envoltórias de pressão para oleoduto projetado com válvula de alívio

VI.4 - ANÁLISE DO TRANSIENTE EM OLEODUTOS OPERANDO EM "CASCATA"

Em oleodutos planos, o gradiente de pressão em regime permanente se estabelece através da "obediência" às condições de contorno e à perda de carga por fricção ao longo do oleoduto. As condições de contorno estabelecidas são os valores de pressão constante nos reservatórios. O gradiente pode ser traçado conforme esquematizado na figura VI.1.

Em oleodutos não planos, eventualmente, e em função da vazão, se estabelecem novas condições de contorno internas ao oleoduto. Essas condições de contorno são impostas pela vaporização do produto no interior da tubulação, fazendo que a pressão não seja nunca inferior à pressão de vapor do produto transportado. Exemplificando através do gradiente do oleoduto hipotético exposto na figura VI.4, verifica-se poder o mesmo ser dividido em secções onde o escoamento se dá como conduto forçado (secções 1, 2, 4 e 6) e secções onde o escoamento se dá com separação de coluna (secções 3 e 5).

As equações desenvolvidas no capítulo II, são válidas para analisar o escoamento em regime permanente ou transiente para as secções 1, 2, 4 e 6. Para as secções 3 e 5 as mesmas não são válidas, uma vez que o escoamento não se dá à secção plena, não sendo válidas as hipóteses e premissas adotadas.

A modelação do fenómeno de separação de coluna adotado por Streeter⁽¹⁶⁾, Kranenburg⁽⁶⁾, Provoost⁽⁸⁾, J. Aga, Karterud⁽³⁾, Milton Sanchez⁽¹¹⁾ e outros, não representa corretamente o fenómeno encontrado nas secções (3) e (5). Essa modelação, considera que a separação de coluna ocorre em uma secção específica

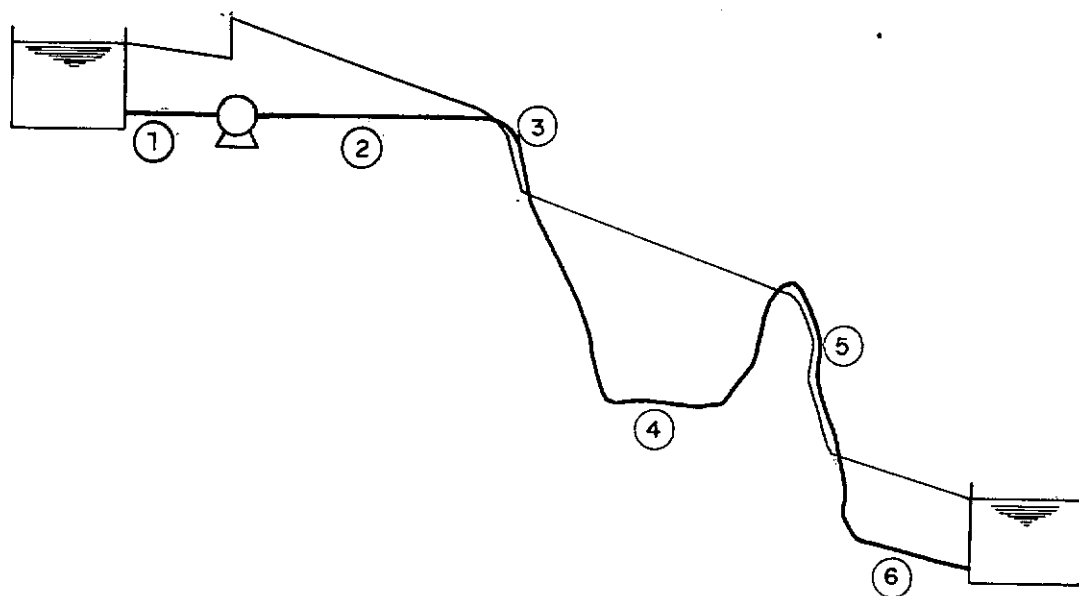


Figura VI.4 — Gradiente de pressão de oleoduto operando em "cascata"

da tubulação durante a análise do transiente hidráulico, admitindo estarem as secções a jusante e montante escoando como condutos forçados. Uma prova simples da inadequação deste procedimento, está na tentativa de calcular o regime permanente com as equações deduzidas por esta modelação. O gradiente de pressão conforme representado na figura VI.4, não é reproduzido pelas equações deste modelo ao se cancelar os termos relativos às derivadas temporais.

De contactos verbais com Dr. Chaudry, Dr. Martin, Dr. Koelle e correspondência trocada com Dr. Wylie, verificou-se dever o problema em questão ser tratado através de sistemas acoplados, sendo as secções 1, 2, 4 e 6 tratadas através das equações de escoamento em condutos forçados (capítulo II), en-

quanto as secções 3 e 5 por equações de escoamento em superfície livre.

O autor desta tese, considera a matéria carente de maiores cuidados em termos de pesquisa e de desenvolvimento teórico, devendo a mesma ser assunto de posteriores trabalhos.

VII - EXEMPLOS DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS ANALISADOS PELO PROGRAMA TRANSH

VII.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Objetivando analisar problemas de transientes hidráulicos em oleodutos, foi elaborado o programa de computador TRANSH. Anteriormente à existência deste programa, a equipe de projeto de oleodutos da Petrobrás obteve insucessos com a utilização de 2 (dois) programas comercializados internacionalmente. A dificuldade, preço e relativa confiabilidade da utilização destes pacotes, motivou a elaboração do programa TRANSH.

Alguns problemas de transientes hidráulicos na área de transporte de petróleo, já foram solucionados pelo programa. A baixo descreveremos 2 (dois) desses casos reais.

VII.2 - OLEODUTO PARA CARREGAMENTO DE NAVIOS

Oleodutos utilizados para carregamento de navios, devem ser dimensionados de forma a resistir as pressões advindas do fechamento de válvula de bloqueio no "manifold" do navio. O oleoduto em tela e esquematizado na figura VII.1 possui comprimento de 170 Km, 140 em terra (onshore) e 30 no mar (offshore).

O navio atraca no pier onde são efetuadas as operações de alinhamento de válvulas tanques etc. No pier se encontram instaladas as válvulas de alívio e o tanque para recebimento da descarga desta. Devido a exigüidade de espaço, o tanque é de pequenas dimensões, possuindo a capacidade de receber um volu-

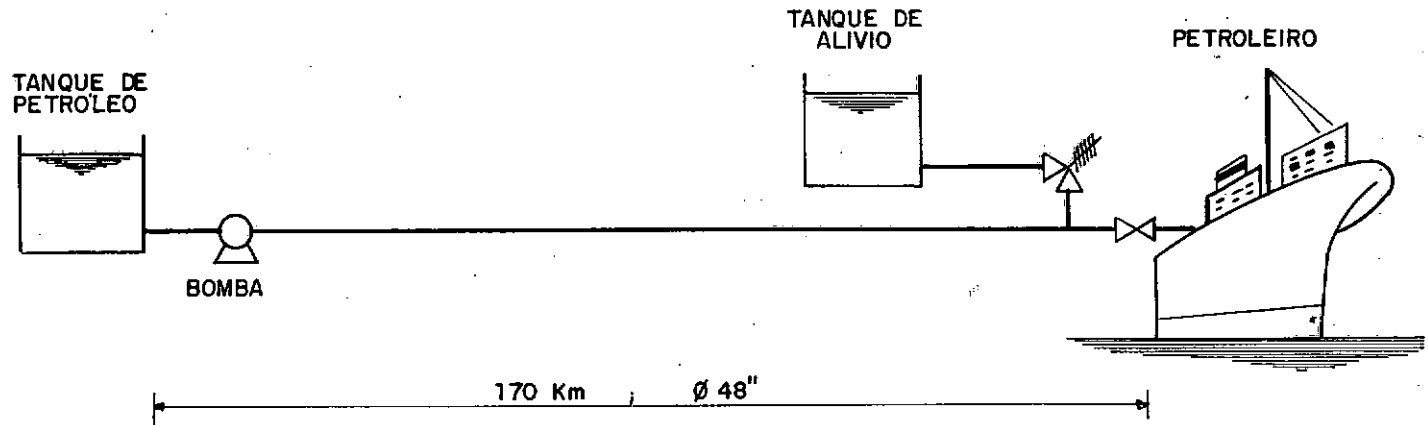


Figura VII.1 — Esquema do oleoduto para carregamento de navios

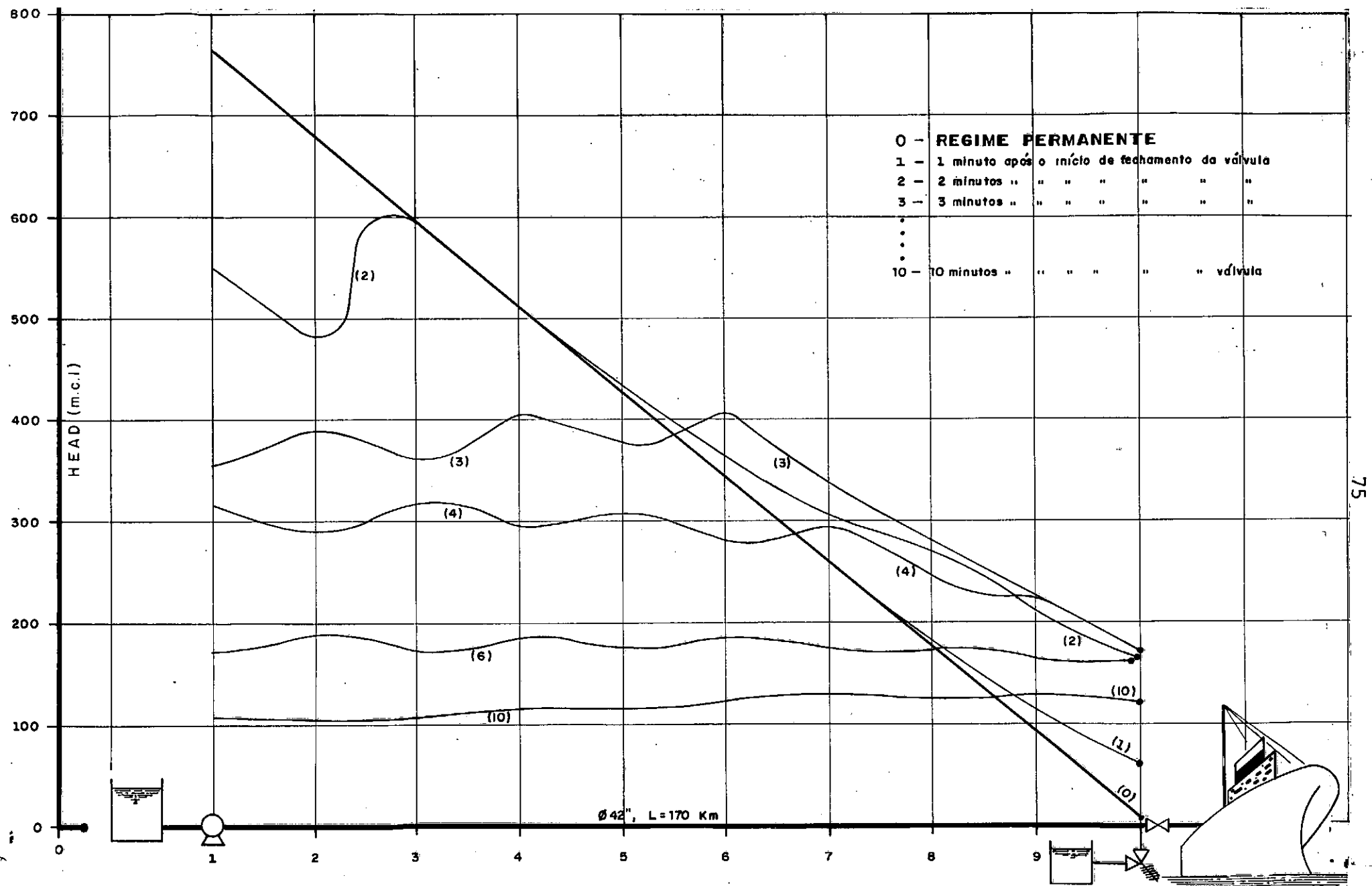
me máximo de petróleo aliviado da ordem de 1000 m³. Todo o sistema de proteção do oleoduto, foi calculado de forma a limitar as pressões máximas ao longo da tubulação, e não transbordar o tanque de alívio.

Como pode ser visto em **Rennó**⁽⁹⁾, o sistema foi concebido da seguinte forma: a- Após o fechamento da válvula as pressões se elevam em todo oleoduto; b- A pressão operacional no pier é de 20 mcl. Quando a pressão neste local, exceder a 132 mcl, um pressostato comanda o desligamento (via telecomunicação) da bomba de carga no parque de tanques; c- Quando a pressão no pier exceder a 154 mcl, as válvulas de alívio abrem descarregando petróleo para o tanque de alívio.

O transiente hidráulico, conforme concebido, foi calculado

lado pelo programa TRANSH demonstrando a viabilidade técnica do esquema de proteção proposto. O gráfico VII.1 apresenta o valor da pressão ao longo do oleoduto durante o transiente. Pode-se verificar que em nenhum momento foi excedida a pressão máxima admissível para a tubulação. O gráfico VII.2 apresenta a variação da vazão na válvula de alívio durante o transiente. A área abaixo da curva traçada representa o volume total aliviado. Calculando a área acima citada, determinou-se um volume de aproximadamente 550 m^3 , compatível com o volume do tanque de alívio.

A bomba de carga foi desligada 111 seg após o início de fechamento da válvula de bloqueio. A válvula de alívio abriu logo em seguida, no mesmo intervalo de tempo de cálculo do transiente.



.Gráfico VII.1 — Envoltórias de pressão ao longo do oleoduto para carregamento de navios

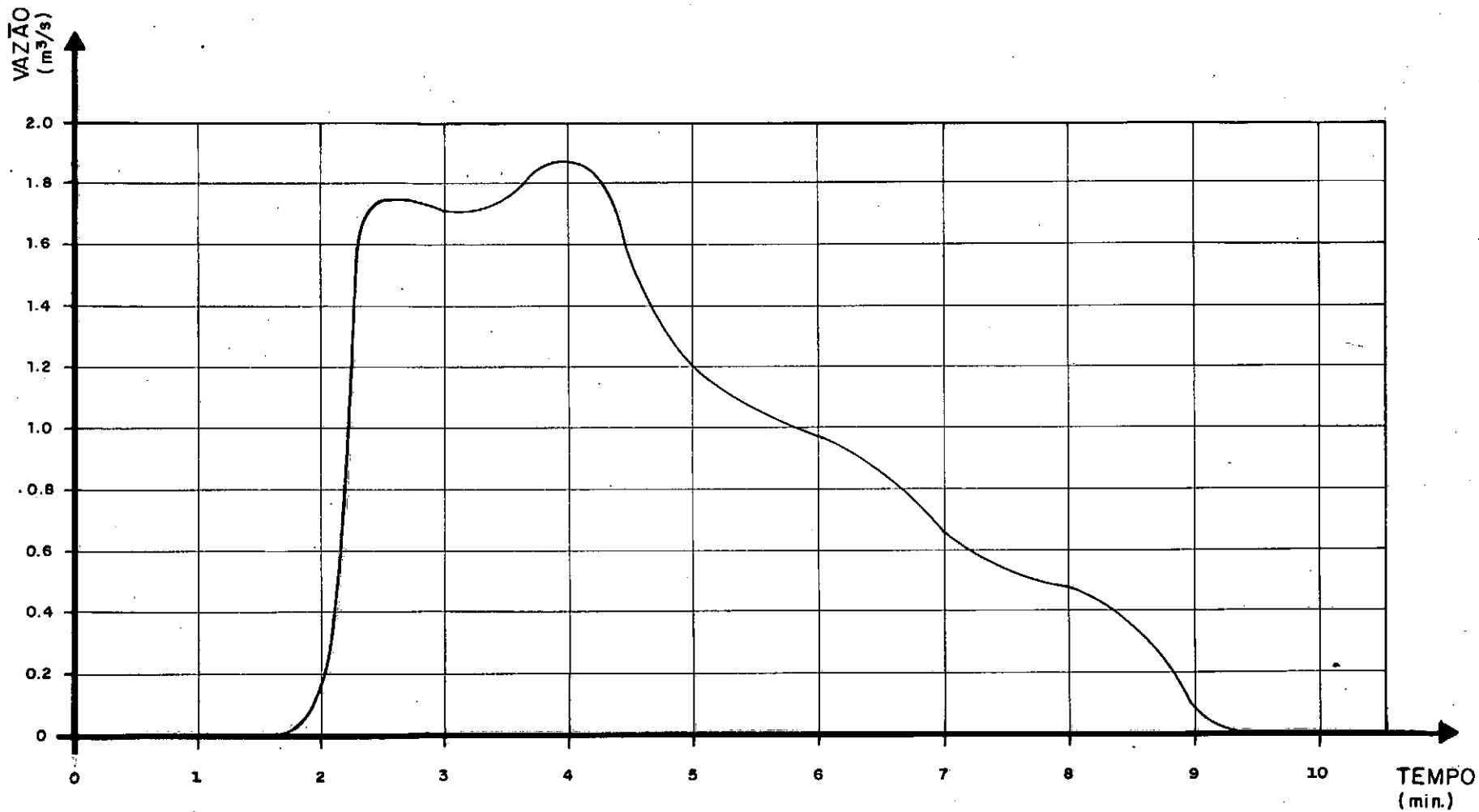


Gráfico VII.2 — Variação da vazão na válvula de alívio, durante o transiente

VII.3 - SISTEMA DE OLEODUTOS DA BACIA DE CAMPOS

VII.3.1 - Descrição do Sistema

O sistema de escoamento de óleo da bacia de Campos é constituído basicamente por 2 (dois) oleodutos submarinos que interligam, respectivamente, a plataforma de Garoupa e Enchova à terra. Estes 2 (dois) oleodutos se entroncam na praia, na estação denominada de Barra do Furado (vide Figura VII.2). Da Barra do Furado segue um oleoduto de 38" até a Estação de Cabiuñas e daí para a REDUC num diâmetro de 32".

Na Barra do Furado há um manifold de válvulas que possibilita o alinhamento dos oleodutos submarinos com o terrestre.

Foram analisadas as pressões na Barra do Furado na ocorrência de uma falha operacional no manejo de válvulas da Estação. Esta falha operacional equivalerá no modelo a um fechamento das válvulas V1, V2 ou V3 quando escoando petróleo de Garoupa, Enchova ou das duas, respectivamente.

VII.3.2 - Análise do Transiente Hidráulico

Como pode ser visto em Rennó⁽¹⁰⁾, foram analisadas 3 (três) situações distintas a saber: fechamento da válvula V1, fechamento da válvula V2 e fechamento da V3.

a - Valores de pressão e vazão ao se fechar a válvula V1:

O fechamento da válvula V1 equivale ao bloqueio do ramal Garoupa - Barra do Furado.

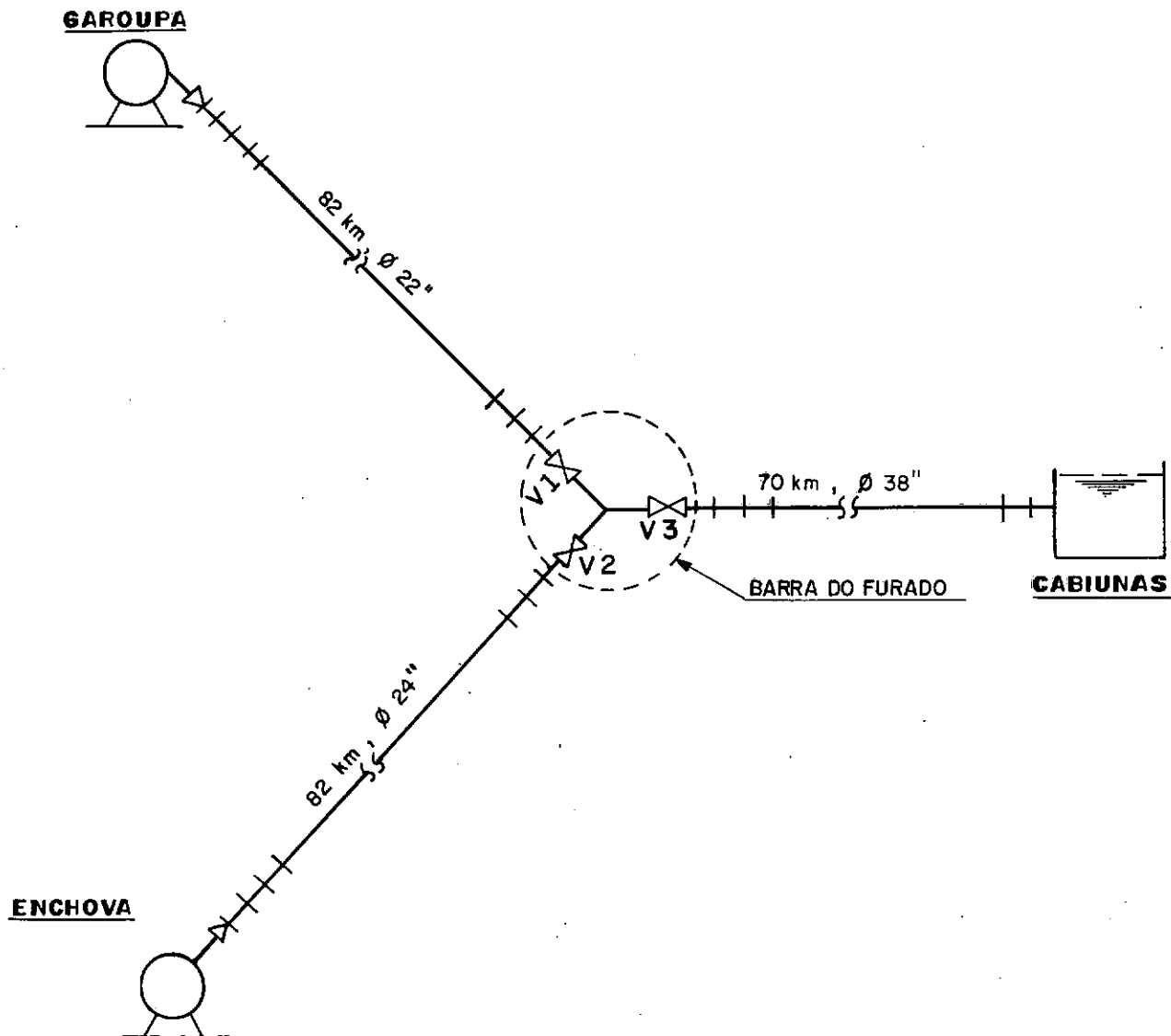


Figura VII.2 — Croquis do sistema de oleodutos da Bacia de Campos

No Gráfico VII.3, traçou-se a curva do valor de (pressão x tempo) na Barra do Furado, à montante da válvula V1. No tempo 0 (zero), a válvula estava totalmente aberta, tendo gasto 60 segundos para fechar.

b - Valores de pressão e vazão ao se fechar a válvula V2:

O fechamento da válvula V2 equivale ao bloqueio do ramal Enchova - Barra do Furado.

No Gráfico VII.4, traçou-se a curva do valor de (pressão x tempo) na Barra do Furado, isto é, a montante da válvula V2.

c - Valores de pressão e vazão ao se fechar a válvula V3:

O fechamento da válvula V3 equivale ao bloqueio simultâneo dos ramais Enchova - Barra do Furado e Garoupa - Barra do Furado.

No Gráfico VII.5, traçou-se as curvas dos valores de (pressão x tempo) na Barra do Furado, à montante da válvula V3. No tempo 0 (zero) a válvula estava totalmente aberta. A curva cheia corresponde a um tempo de fechamento da válvula de 60 segundos. A pontilhada, corresponde a um tempo de fechamento de 600 seg.

d - Pela análise das figuras traçadas, concluiu-se que os equipamentos instalados na Barra do Furado admitem as pressões advindas de falha operacional no manejo de válvulas da Estação. Portanto, não foi necessário instalar sistema de alívio na Estação de Barra do Furado.

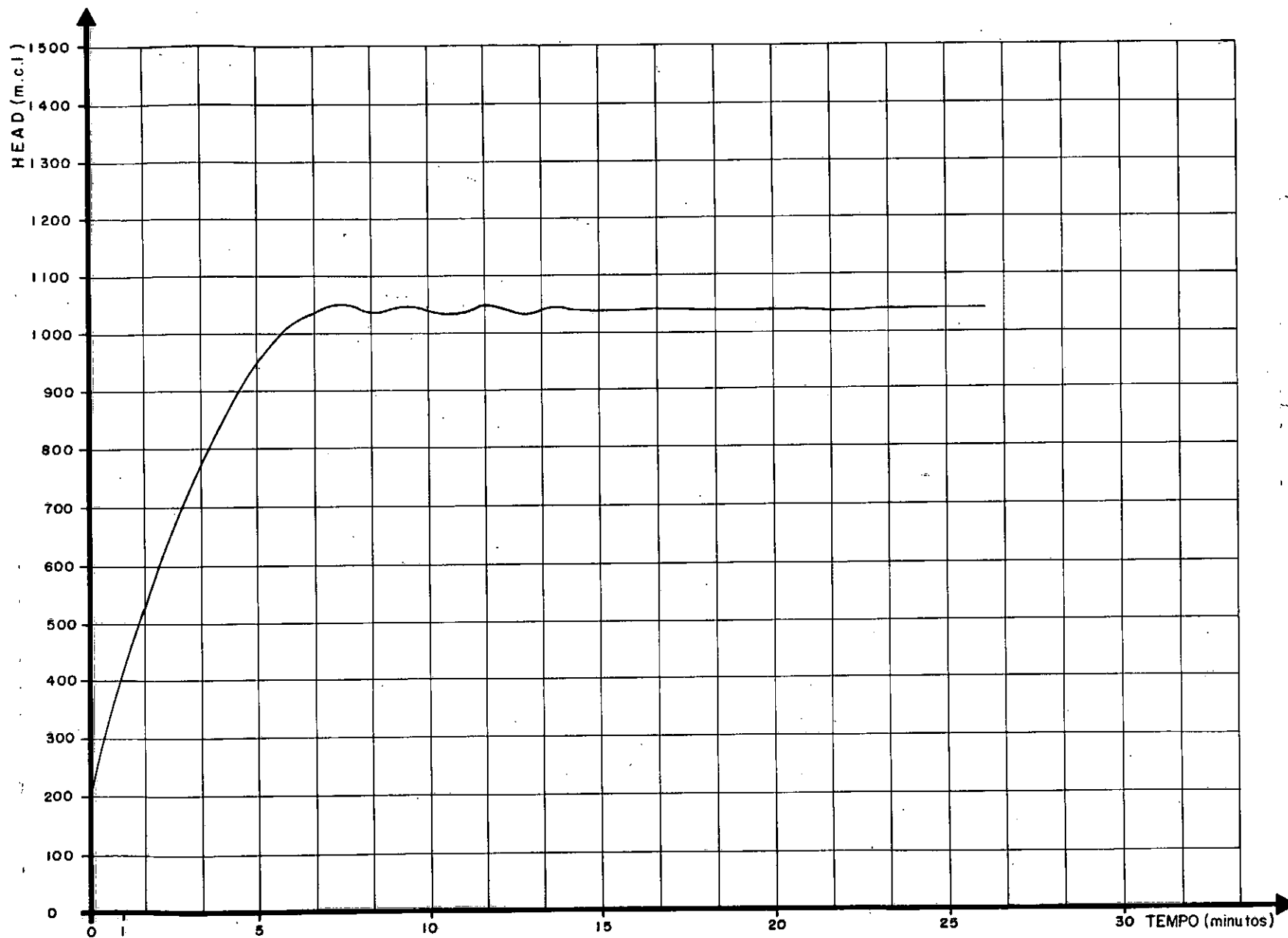


Gráfico VII.3 — Head x tempo na Barra do Furado, após fechamento de V1

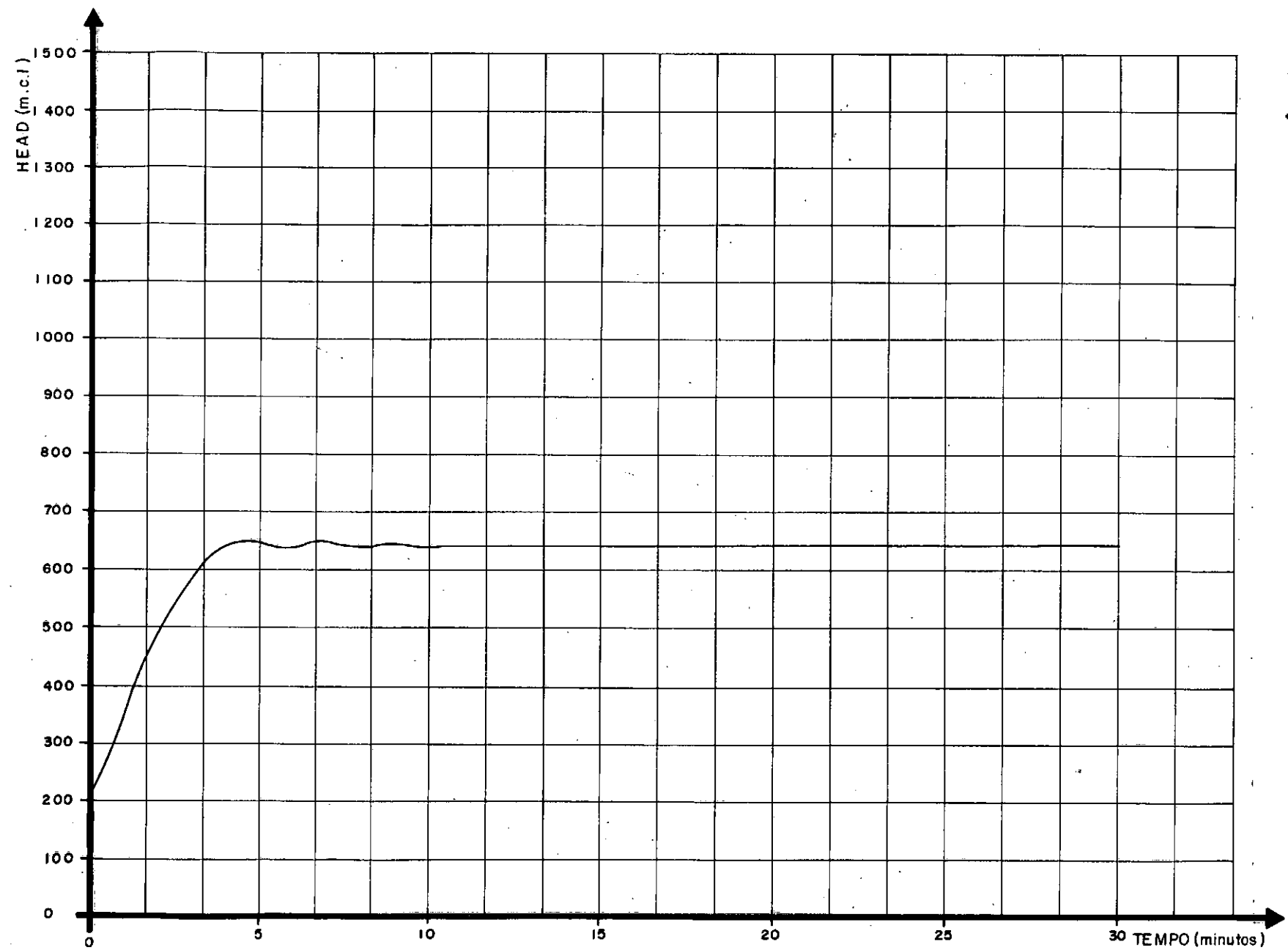


Gráfico VII.4 — Head x tempo na Barra do Furado, após fechamento de V2

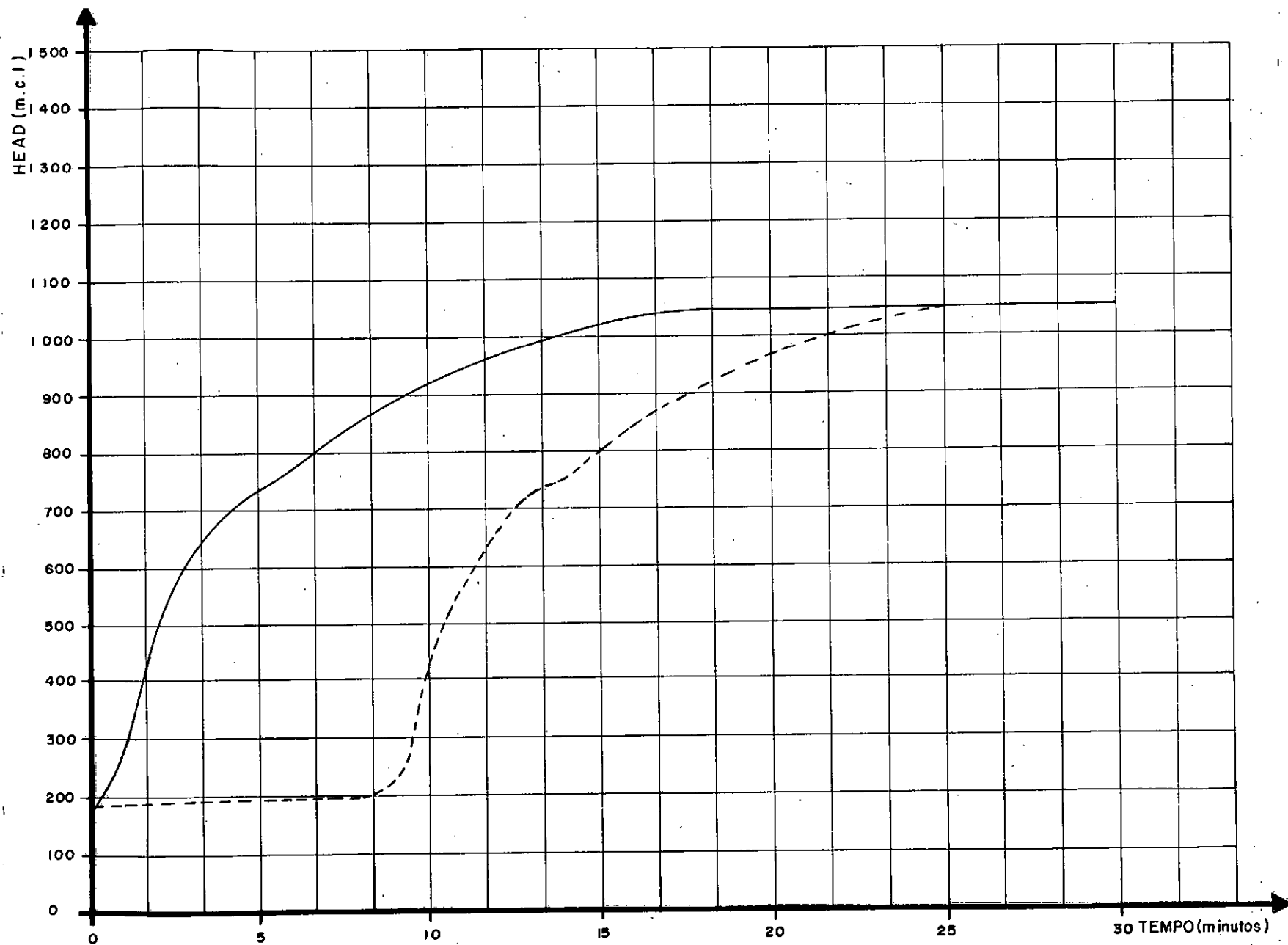


Gráfico VII.5 — Head x tempo na Barra do Furado, após fechamento de V3

VIII - CONCLUSÕES

O advento do computador possibilitou a resolução por métodos numéricos das equações diferenciais parciais hiperbólicas que descrevem o fenômeno do transiente hidráulico. O método das características utilizado no presente trabalho, transforma as equações diferenciais parciais hiperbólicas em equações diferenciais ordinárias, transformando-as finalmente em equações algébricas pelo método das diferenças finitas. Este procedimento de cálculo, faculta a solução de qualquer problema de transientes em sistemas hidráulicos de condutos forçados, transportando fluidos monofásicos. A teoria existente para o tratamento de transientes hidráulicos em sistemas multi-fásicos (como pode ser considerado o fenômeno da separação de coluna), ainda está carente de maiores avanços, uma vez que nem mesmo a determinação de equações confiáveis para a interpretação do regime permanente, ainda não estão disponíveis.

A utilização do modelo matemático citado acima e a consideração dos equipamentos normalmente utilizados em oleodutos pela indústria do petróleo, deram origem ao programa de computador TRANSH, objeto desta tese. Este programa resolve os transientes hidráulicos determinísticos em oleodutos sob o aspecto operacional (e de dimensionamento).

O programa calcula os transientes de oleodutos que se enquadram nas configurações previstas pelo mesmo e normalmente encontrados na prática. Expansões e adaptações podem ser executadas visando resolver problemas específicos de oleodutos que possuam equipamentos em instalações ora não modelados pelo programa.

Visando dar maior economicidade ao dimensionamento de oleodutos, é primordial a execução do estudo dos transientes hidráulicos aos quais o mesmo poderá ser submetido. Esse estudo somente pode ser feito com precisão, via métodos computacionais. A existência e a utilização de programas de computador (TRANSH) possibilitou a atualização dos procedimentos de projeto de oleodutos, com sensíveis reduções na espessura de tubulação utilizada e conseqüente redução de investimento.

SIMBOLOGIA**LETRAS LATINAS**

- a - Celeridade da onda
- A - Área da secção transversal do oleoduto
- B - Parâmetro
- COEF1 - Coeficiente linear de ajuste da curva da bomba
- COEF2 - Coeficiente quadrático de ajuste da curva da bomba
- CM - Parâmetro associado a característica C^-
- CP - Parâmetro associado a característica C^+
- C_v - Coeficiente auxiliar da válvula
- C_1 - Coeficiente de fixação ao solo
- C_1 - Constante auxiliar no cálculo da inércia concentrada
- C_2 - Constante auxiliar no cálculo de inércia concentrada
- C^+, C^- - Retas características
- D - Diâmetro da tubulação
- e - Espessura da tubulação
- E - Módulo de Elasticidade do material da tubulação
- EM - Expoente da lei de fechamento da válvula
- f - Fator de atrito de Darcy-Weisbach (Moody)
- F - Equação no método iterativo de Newton-Raphson
- g - Aceleração da gravidade
- G - Densidade
- H - Head ou carga piezométrica
- HJBP - Head a jusante da bomba
- HMBP - Head a montante da bomba

- HP - Head ou carga piezométrica no instante do cálculo
- HR - Altura do nível do líquido do reservatório
- HS - Head de Shutt-off (vazão zero) da bomba
- HTANQS- Altura do nível do líquido no reservatório de sucção
- HTQAI - Altura do nível do líquido no reservatório de alívio
- K - Módulo de elasticidade volumétrico do fluido
- k - Coeficiente de descarga da válvula
- L - Comprimento da tubulação
- M - Massa
- N - Número de trechos do oleoduto
- p - Pressão
- P_B - Contra-pressão na válvula de alívio
- P_S - Pressão de ajuste de abertura da válvula de alívio
- Q - Vazão volumétrica
- QP - Vazão volumétrica no instante do cálculo
- R - Parâmetro
- s - Acrêscimo/expansão da tubulação no sentido axial
- t - Tempo
- t_c - Tempo de fechamento da válvula
- u - Velocidade do volume de controle
- v - Velocidade do fluido
- V - Volume
- x - Variável distância
- z - Elevação da linha de centro da tubulação em relação ao referencial arbitrado

LETRAS GREGAS

- α - Ângulo de inclinação da tubulação
- γ - Peso específico do fluido
- δ - Infinitésimo de comprimento
- λ - Constante auxiliar no método das características
- ϵ_1 - Deformação longitudinal da tubulação
- ϵ_2 - Deformação circunferencial da tubulação
- μ - Módulo de Poisson do material
- π - Razão perímetro/diâmetro (3, 1416)
- ρ - Massa específica do fluido
- τ - Razão (coeficiente de descarga no regime permanente/
coeficiente de descarga do transiente)
- τ_0 - Tensão de cisalhamento na parede da tubulação
- σ_1 - Tensão longitudinal na tubulação
- σ_2 - Tensão circunferencial na tubulação

SUBSCRITOS

- 0 - Relativo ao regime permanente inicial
- 1 - Relativo à secção 1
- 2 - Relativo à secção 2
- 3 - Relativo à secção 3
- A - Relativo à uma das secções da malha do transiente no intervalo de tempo anterior ao do cálculo
- B - Idem
- I,i- Relativo a uma das secções do oleoduto
- P - Relativo a uma das secções da malha do transiente no intervalo de tempo do cálculo
- t - Derivada parcial relativa à variável tempo
- T - Relativo ao sentido transversal da tubulação
- x - Derivada parcial relativa à variável espaço

OPERADORES

- \dot{A} - Derivada total, substantiva ou material da variável A em relação ao tempo
- $\frac{DA}{DT}$ - Idem
- $\frac{\partial A}{\partial x}$ - Derivada parcial da variável A em relação à variável x
- $\frac{dA}{dx}$ - Derivada ordinária da variável A em relação à variável x
- $||$ - Módulo
- sen - Seno
- \ll - Muito menor
- Δ - Incremento
- ∇ - Divergente

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CAETANO, E.F. e NILTON, C.C. - "Estudo de sobrepressão e transientes hidráulicos em oleodutos". Relatório técnico Petrobrás/CENPES. Março/82.
2. CHAUDRY, M.H. - "Numerical Methods for solution of closed conduit transient flow equations". Intercâmbio Internacional de transientes hidráulicos e cavitação - USP/São Paulo, 12 a 30/07/82.
3. J. AGA, T.S. Karterud, T.K. Nielsen - "Testing of transient flow and column separation in crude oil pipelines" - Third International Conference on pressure surges - Canterbury/England. Março/80.
4. KOELLE, E. - "Transientes hidráulicos". Rio de Janeiro, Petrobrás. Apostila e notas de aula, 1980.
5. _____. "Transientes hidráulicos em condutos forçados-Equações básicas". Intercâmbio Internacional de transientes hidráulicos e cavitação. USP/São Paulo, 12 a 30/07/82.
6. KRANENBURG, C. and KALKWIJK, J.P. Th. - "Investigation into cavitation in long horizontal pipelines caused by water hammer". Delft University of Technology. Publication 115. Fev/74.
7. MARTIN, C. Samuel - "Representation of characteristics of hydraulic machinery". Intercâmbio Internacional de transientes hidráulicos e cavitação. USP/São Paulo, 12 a 30/07/82
8. PROVOOST, G.A. - "Investigation into cavitation in a prototype pipeline caused by water hammer" - Delft hydraulics laboratory. Publication nº 170. Nov/76.

9. RENNO, M.R.G. - "Preliminary Surge Report". Trabalho técnico. Análise de transientes hidráulicos em oleoduto para carregamento de navios. Petrobrás/SEGEN - RL/ME-0001. Jan/83.
10. _____. "Transientes hidráulicos". 1º Seminário de uso do computador na Engenharia. Rio, 03 a 05/08/81.
11. SANCHEZ, Milton Gonçalves - "Modelos de cálculo numérico do golpe de ariete com separação de coluna líquida". Intercâmbio Internacional de transientes hidráulicos e cavitação. USP/São Paulo, 12 a 30/07/82.
12. THORLEY, A.R.D. and ENEVER, K.J. - "Control and Supression of pressure surges in pipelines and tunnels". Ciria Report 84. Set./79.
13. TULLIS, J.P. - "Cavitação em sistemas hidráulicos" - Intercâmbio internacional sobre transientes hidráulicos e cavitação. 12 a 30/07/82.
14. WIJDIEKS, J. - "Water hammer in large oil transmission lines". Delft hydraulics laboratory. Publication nº 98. Abril/72.
15. WOOD, Don J. and S.E. Jones - "Water hammer charts for various types of valves". Journal of the Hydraulic Division. Jan./73.
16. WYLIE, E.B. and STREETER, V.L. - "Fluid transients". New York, Mc Graw-Hill, 1978.